

**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS  
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC  
OF BELARUS  
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

**BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

**BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY**

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF BELARUS**

# **INSTRUMENTATION ENGINEERING-2018**

**Proceedings  
of the 11th International Scientific and Technical Conference**

November 14–16, 2018  
Minsk, Belarus

**Minsk  
BNTU  
2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2018**

**Материалы  
11-й Международной научно-технической конференции**

14–16 ноября 2018 года  
Минск, Республика Беларусь

**Минск  
БНТУ  
2018**

УДК 681.2(063)  
ББК 34.9я431  
П75

**Редакционная коллегия:**

д-р техн. наук, профессор *О.К. Гусев* (председатель);  
канд. экон. наук, доцент *Е.В. Гурина*; д-р техн. наук, доцент *Н.А. Жагора*;  
д-р техн. наук, профессор *М.Г. Киселёв*; д-р физ.-мат. наук, доцент *М.А. Князев*;  
д-р физ.-мат. наук, профессор *Н.В. Кулешов*; чл.-кор. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук,  
профессор *А.М. Маляревич*; д-р физ.-мат. наук *В.В. Машко*;  
чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *Ю.М. Плескачевский*;  
д-р техн. наук, профессор *П.С. Серенков*; д-р техн. наук, профессор *В.Л. Соломахо*;  
чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *С.А. Чижик*;  
д-р физ.-мат. наук, профессор *К.В. Юмашев*; канд. техн. наук,  
доцент *Р.И. Воробей*; канд. техн. наук, доцент *А.К. Тявловский* (отв. секретарь)

**Рецензенты:**

д-р техн. наук, профессор *Л.М. Лыньков*;  
чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *А.В. Белый*

Издание включает материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2018» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; оптико-электронные системы, лазерная техника и технологии; управление производством и подготовка специалистов для приборостроительной отрасли.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

**ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ**

УДК 620.179.1

**НОВЕЙШИЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ В КАНУН 55-ЛЕТИЯ СО ДНЯ ОБРАЗОВАНИЯ  
Шуляковский Р.Г., Асадчая М.В.***Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

В 2018 году Институт прикладной физики НАН Беларуси отмечает 55-летие со дня образования. Становление Института связано с именем выдающегося физика-магнетолога, лауреата Государственных премий СССР и БССР, Рокфеллеровской премии и премии им. М.В. Ломоносова, академика Н.С. Акулова. В 1963 г. Н.С. Акуловым на базе лаборатории физических проблем Физико-технического института АН БССР был образован Отдел физики неразрушающего контроля. В 1980 г. Отдел физики неразрушающего контроля был преобразован в Институт прикладной физики АН БССР, первым директором которого стал член-корреспондент Н.Н. Зацепин, внесший большой вклад в развитие института.

Институт прикладной физики НАН Беларуси является ведущим научным центром в Республике Беларусь в области физики неразрушающего контроля и технической диагностики. За последние годы учеными Института в рамках выполнения заданий подпрограммы «Техническая диагностика», программ Союзного Государства, грантов Фонда фундаментальных исследований получены существенные результаты по взаимодействию магнитных, электромагнитных, акустических и других полей с материалами и создан ряд новых важных разработок.

Разработана линейка толщиномеров покрытий типа МТЦ, работа которых основана на магнитодинамическом принципе действия. Толщиномер МТЦ-3 позволяет измерять толщину неферромагнитных покрытий в диапазоне от 0 до 10 мм на ферромагнитных основаниях (хром, медь, цинк, лак, краска и т. п. на конструкционных сталях), а также никелевых покрытий от 0 до 150 мкм на неферромагнитных основаниях.

В результате выполнения заданий программ Союзного Государства «Космос-НТ» и «Мониторинг СГ» разработаны толщиномеры специального назначения МТНП-1 и МТДП-1 [1]. Толщиномер МТНП-1 позволяет измерять толщину никелевых покрытий камер жидкостных ракетных двигателей (трехслойные структуры никель-бронза-ферромагнитная сталь) в диапазоне от 0 до 700 мкм. Толщиномер МТДП-1 предназначен для измерения таких же никелевых покрытий и нанесенного на них гальванического хрома толщинами до 150 мкм. Приборы поставлены на профильные предприятия Российской Федерации, по обеспечиваемому диапазону измерений и функциональным возможностям они не имеют мировых аналогов.

Разработана серия вихретоковых приборов и устройств, включающая толщиномеры проводящих покрытий на проводящих и диэлектрических основаниях, а также дефектоскопы и автоматизированные дефектоскопические комплексы, содержащие набор вихретоковых преобразователей и характеризующиеся высокой чувствительностью к нарушениям сплошности материала контролируемого изделия [2]. Они обеспечивают повышенную, по сравнению с аналогами, производительность контроля и достоверность обнаружения дефектов в ферромагнитных изделиях (трещин, раковин, пор и др.) при наличии различных мешающих факторов (высокая шероховатость поверхности, присутствие на ней окалина, ржавчины и т. п.).

Разработан портативный радиолокатор для визуализации структуры строительных конструкций, обнаружения и распознавания различных неоднородностей в них (арматура, пустоты, трещины). В радиолокаторе применены два ключевых усовершенствования: новая сверхширокополосная антенная система диапазона частот 1-4,3 ГГц и компактный радиолокационный тракт с пониженным уровнем помех, что позволяет обнаруживать более мелкие неоднородности в бетонных конструкциях [3].



Рисунок 1 – Портативный радиолокатор

В рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» разработан метод реконструкции динамических полей концентрации электронов в ионосфере [4]. Метод основан на теории фильтра Калмана и позволяет осуществлять реконструкцию полей концентрации электронов в ионосфере по данным высокоорбитальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, работает в реальном масштабе времени и отслеживает динамику изменения поля ионосферы.

Разработан портативный твердомер ТПЦ-7, предназначенный для неразрушающего измерения твердости изделий из углеродистых кон-

струкционных сталей по шкалам Бринелля, Роквелла и Виккерса в энергетике, строительстве, машиностроении, металлургии [5]. ТПЦ-7 обладает малыми габаритными размерами и массой, позволяет проводить измерения при произвольной ориентации твердомера в пространстве.



Рисунок 2 – Портативный твердомер ТПЦ-7

Программно-аппаратный комплекс ИСУМ-1 предназначен для неразрушающего измерения твердости и модуля упругости углеродных и графитовых материалов (УГМ) методом динамического индентирования [6]. ПАК ИСУМ-1 является альтернативной применяемым в настоящее время при производстве авиационной и ракетно-космической техники разрушающим методам испытаний, поскольку позволяет проводить контроль качества изготовления непосредственно изделий из УГМ и отказаться от образцов-свидетелей.

Разработан новый научный подход для оценки штампуемости стального листа на производстве, а также для определения анизотропии механических и магнитных свойств листового проката сталей [7]. Новый вариант импульсного магнитного метода контроля позволяет раздельно определять магнитные свойства по различным направлениям на листе. Проведенные исследования показали возможность такого контроля магнитных свойств по направлениям относительно прокатки [8].

Новые разработки в области ультразвукового контроля находят широкое применение на предприятиях республики и за рубежом. Метод и устройство ИЧ-31 для измерения глубины упрочненных слоев предназначены для контроля толщины упрочненного слоя (закалка после цементации, ТВЧ закалка, лазерная закалка) неразрушающим методом с точностью 0,1 мм в диапазоне толщин слоев от 0 до 3 мм. Индикатор позволяет выявить области с недостаточной глубиной закалки или отсутствием упрочнения при изготовлении деталей и входном контроле. Прибор не имеет аналогов в мире, принцип его действия основан на анализе акустических характеристик упрочненного слоя [9].

Индикатор механического напряжения растяжения И4-М предназначен для определения действующих внутренних механических напря-

жений 1-го рода в резьбовых соединениях в процессе затяжки [10]. Принцип действия прибора основан на существующей в области упругих деформаций зависимости скоростей распространения объемных упругих волн от величин механических напряжений.

В рамках ГНТП «Эталонные и научные приборы» разработаны магнитоизмерительные эталонные установки (ЭУ), которые являются верхним звеном поверочных схем при испытании электротехнических сталей (ЭТС) на частоте 50 Гц и широкого класса магнитомягких материалов (МММ) при частоте перемагничивания от 50 до  $2 \cdot 10^4$  Гц [11]. ЭУ в совокупности с соответствующими стандартными образцами предназначены для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц удельных магнитных потерь и магнитной индукции в ЭТС и МММ рабочим средствам измерения при их аттестации, поверке и калибровке. Реализация указанных проектов создала научные, методические и метрологические основы для сертифицированных испытаний широкого класса МММ в РБ. Это позволяет, например, проводить в соответствии с установленными нормами 100 % входной контроль магнитных свойств всей закупаемой ОАО «МЭТЗ им. В.И. Козлова» ЭТС.

Установка для испытаний магнитопроводов трансформаторов тока (тестер магнитопроводов ТМ) предназначена для испытаний магнитопроводов трансформаторов тока, включая трансформаторы для коммерческого учета электроэнергии. Позволяет проводить измерение магнитных характеристик магнитопроводов в широком диапазоне магнитных полей – от 0,3 А/м, отличается высокой производительностью – суммарное время испытания одного магнитопровода не более 10 секунд. Используется для оперативного технологического контроля магнитопроводов в потоке производства.

На таких знаковых объектах Республики Беларусь, как «Минск-Арена», «Минск-Чижовка», Центр Фристайла, высотные здания «Парус» и «Грин-Сити» в г. Минске, внедрена разработанная в ИПФ НАН Беларуси система автоматического мониторинга строительных конструкций (СМСК), предназначенная для непрерывного наблюдения за состоянием несущих конструкций зданий и сооружений в ходе их строительства и эксплуатации. СМСК включает разработанные прецизионные датчики деформаций, углов наклона, ускорений, способы и устройства их лабораторной калибровки, установки и настройки на конструкции, последующей поверки, системы цифровой передачи данных от датчиков к вычислительному серверу, программное обеспечение для обработки больших сенсорных данных, измеряемых датчиками, и систему приближенной оценки безопасности строительных конструкций [12].

Приоритетным направлением деятельности ИПФ НАН Беларуси является решение актуальных задач неразрушающего контроля качества непосредственно для промышленных предприятий республики. Практическое использование разработанных в институте методов и средств неразрушающего контроля позволяет повысить качество и конкурентоспособность национальной продукции, надежность и безопасность функционирования промышленных объектов.

### Литература

1. Лухвич, А.А. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий под хромовыми на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях / А.А. Лухвич, О.В. Булатов, А.Л. Лукьянов, М.Н. Полякова, В.В. Мосякин // Дефектоскопия, 2015. – № 1. – С. 3–10.
2. Чернышев, А.В. Вихретоковый дефектоскоп для контроля гильз блока цилиндров двигателя / А.В. Чернышев, И.Е. Загорский // Контроль. Диагностика, 2014. – № 4. – С. 70–73.
3. Mikhnev V., Badeev V. A semicircle bowtie antenna for subsurface radar applications in civil engineering // 11th European Conference on Antennas and Propagation, Paris, 19-24 March 2017. – 3p.
4. Артемьев, В.М. Нелинейные алгоритмы реконструкции полей концентрации электронов в ионосфере / В.М. Артемьев, А.О. Наумов // Седьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса: в 2т., 24-26 октября 2017 года, Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2017. – Т. 2. – С. 46–50.
5. Крень, А.П. Применение методов индентирования для неразрушающего контроля физико-механических характеристик конструкционных материалов / А.П. Крень, В.А. Рудницкий // Приборостроение-2016: материалы МНТК / Минск : БНТУ, 2016. – Том 1. – С. 11.
6. Крень, А.П. Применение метода динамического индентирования для контроля механических характеристик композиционных материалов / А.П.Крень, О.В. Мацулевич // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 6-й МНТК / Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 265–269.
7. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика, 2014. – № 3. – С. 20–33.
8. Стрелюхин, А.В. Моделирование процесса намагничивания тонкого листового проката из конструкционной стали / А.В. Стрелюхин, А.А. Осипов // Приборостроение-2016: материалы 9-й МНТК. – Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Минск, БНТУ, 2016. – С. 383–385.
9. Об определении глубины поверхностного упрочнения металлов ультразвуковыми методами / А.Р. Баев [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 6-й МНТК / Могилев: БРУ, 2017. – С. 355–360.
10. Левкович, Н.В. Метод и оборудование для безэталонного измерения напряжения растяжения при затяжке резьбовых соединений / Н.В. Левкович, А.Л. Майоров, В.В. Парадинец // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы МНТК. - Могилев, 14–15 апреля 2016 г. / Могилев, БРУ, 2016. – С. 265–266.
11. Сертифицированные испытания электротехнических сталей при частоте магнитного поля 50 Гц / И.И. Брановицкий [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 2. – С. 16–21.
12. Венгринович, В.Л. Мониторинг сложных объектов по техническому состоянию / В.Л. Венгринович // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 6-й МНТК. – Могилев, 19-20 сентября 2017 г. / Могилев, БРУ, 2017. – С. 9–23.

УДК 621.375.826

## ИТТЕРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЯ Кисель В.Э., Руденков А.С., Кулешов Н.В.

*НИЦ Оптических материалов и технологий филиала БНТУ НИПИ, Минск, Республика Беларусь*

Одним из основных направлений научно-исследовательских работ НИЦ оптических материалов и технологий филиала БНТУ НИПИ, является разработка твердотельных лазерных систем с диодной накачкой на основе новых лазерных материалов, активированных трехвалентными ионами иттербия. Данные лазерные системы находят широкое применение в различных областях науки и техники от изучения быстропотекающих процессов в различных наноматериалах до прецизионной

обработки различных материалов и систем локации и дальнометрии.

Основные результаты выполнения научных исследований за последние годы в области лазерной техники и новых материалов:

Проведен цикл работ по спектроскопии ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в кристаллах алюминатов  $\text{LuAlO}_3$ ,  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{CaYAlO}_4$  и  $\text{CaGdAlO}_4$ ; ванадатов  $\text{YVO}_4$ ; боратов  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ; вольфраматов  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  и  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ; гранатов  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ .

Разработаны новые высокоэффективные лазерные материалы на основе указанных кристаллов, а выпуск кристаллов вольфраматов и ванадатов освоен отечественными предприятиями (завод «Оптик», г. Лида, НПП «Соликс», г. Минск).

Разработаны эффективные лазерные системы с продольной диодной накачкой, работающие в различных режимах генерации (непрерывные лазеры, лазеры с пассивной и активной модуляцией добротности, фемтосекундные лазеры с пассивной синхронизацией мод) и усилении chirпированных ультракоротких импульсов.

Для большинства исследованных материалов лазерная генерация при продольной диодной накачке продемонстрирована впервые в мире, а для известных лазерных материалов, таких как кристаллы вольфраматов  $KY(WO_4)_2$  и  $KGd(WO_4)_2$  получена генерация фемтосекундных импульсов с рекордным сочетанием параметров: пиковая мощность импульса до 1 МВт; энергия импульса до 150 нДж; длительность менее 165 фс и средняя выходная мощность 8,8 Вт. Впервые получена генерация фемтосекундных импульсов в лазере на основе нового лазерного кристалла – иттриевого ванадата – с ионами иттербия с выходной мощностью свыше 1 Вт при диодной накачке в режиме синхронизации мод за счет самофокусировки лазерного излучения в активной среде с рекордной для иттербиевых лазеров длительностью импульсов 61 фс.

Впервые в мире продемонстрированы лазеры на иттербиевых материалах, работающие в режиме активной модуляции добротности со средними выходными мощностями более 10 Вт и оптической эффективностью более 50 %, что представляет существенный интерес для применений в микрообработке и маркировке различных материалов.

Регенеративное усиление chirпированных фемтосекундных импульсов в лазерных системах на основе кристаллов ванадатов ( $YVO_4$ ), боратов ( $YAl_3(BO_3)_4$ ) и алюминатов ( $CaYAlO_4$ ,  $LuAlO_3$ ), легированных трехвалентными ионами иттербия  $Yb^{3+}$ , реализовано впервые в мире. Также впервые показана возможность использования полосы усиления активного элемента как амплитудного фильтра для эффективного усиления широкополосного фемтосекундного излучения, так в кристалле  $Yb^{3+}:LuAlO_3$  импульсы задающего генератора с центральной длиной волны в диапазоне (1035-1045) нм и полушириной 11,7 нм в процессе регенеративного усиления демонстрируют увеличение спектральной полуширины до 14 нм за счет дискриминация центральных и эффективного усиления периферических спектральных компонент излучения.

Впервые в мире продемонстрированы микро-чип лазеры на иттербиевых материалах, работающие в режиме непрерывной генерации с выходными мощностями до 10 Вт, стабильно работающие в широком температурном диапазоне от -50 до +60°C без системы принудительной стабилизации температуры отдельных частей излучателя. Серийный выпуск данных лазерных излучателей освоен ОАО «Пеленг» для использования в системах управления движущимися объектами.

В рамках выполнения НИР разработана оригинальная схема осевой продольной накачки, обладающая пространственной, спектральной и поляризационной независимостью излучения накачки и  $TEM_{00}$  моды резонатора лазера, что позволило получить генерацию излучения с разницей между длинами волн накачки и генерации менее 1 % и продемонстрировать перестройку длины волны  $Yb^{3+}:CaYAlO_4$  лазера в диапазоне более 100 нм от 982 до 1086 нм при накачке в области 980 нм.

На основе фемтосекундных лазеров создана лабораторная установка для измерения быстропротекающих процессов в конденсированных средах и твердых телах с разрешением около  $1 \times 10^{-13}$  с и высокой чувствительностью по оптической плотности (до  $10^{-4}$ ). В настоящее время с помощью созданного спектрометра исследуются полупроводниковые наноразмерные структуры, разрабатываемые партнерами из Института физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук, для применения в лазерно-оптической технике.

Разработан микро-чип лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности на основе кристалла  $Yb:YAG$  с пиковой мощностью 3 кВт и высокой частотой следования импульсов (до 100 кГц) для применения в биологии (проточная цитометрия).

Наиболее перспективными направлениями инновационных разработок НИЦ ОМТ являются:

- разработка систем для прецизионной обработки материалов на основе мощных фемтосекундных лазеров с диодной накачкой;
- разработка микролазеров и микрочип лазеров с использованием новых лазерных материалов (активных сред и пассивных затворов) для биомедицинских применений и систем локации и дальнометрии;
- разработка новых материалов для твердотельных лазеров, работающих в различных режимах генерации.

Указанные разработки востребованы предприятиями Беларуси (АО «Пеленг», УП «ЛЭМТ», заводом «Оптик» г. Лида, НПП «Соликс», ЗАО «Солар ЛС» и др.).

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ОАО «ПЕЛЕНГ»**

**Сикорский Д.А., Котов М.Н., Подскребкин И.В.**

*ОАО «Пеленг», Минск, Республика Беларусь*

Открытое акционерное общество «Пеленг» – ведущее предприятие Республики Беларусь в сфере разработки наукоемкой оптико-электронной продукции широкой области применения.

ОАО «Пеленг» ведет свою историю с 1974 года, когда в результате реорганизации конструкторского отдела Минского механического завода (входившего в состав Белорусского оптико-механического объединения) образовалось Центральное конструкторское бюро «Пеленг».

В настоящее время предприятие предлагает полный спектр услуг: от разработки и производства оптико-электронных приборов и систем до их интеграции на объектах Заказчика, а также гарантийное и послегарантийное обслуживание.

Значимое место среди видов деятельности предприятия занимает разработка оптико-электронных аппаратов для дистанционного зондирования Земли из космоса. С момента основания предприятие разрабатывало и изготавливало серийно топографические и мультиспектральные фотоаппараты пленочного типа. В 2001-04г. ОАО «Пеленг» осуществило переход на «цифру».

22 июля 2012 года два идентичных оптико-электронных аппарата (ОЭА), изготовленных в ОАО «Пеленг», в составе Белорусского космического аппарата (БКА) и космического аппарата «Канопус-В» выведены на орбиту Земли. Проект оказался успешным: на текущий момент в кос-

мосе функционируют 5 таких ОЭА, еще 2 планируется вывести на орбиту.

ОЭА БКА состоит из двух систем: зеркально-линзовой панхроматической одноканальной и линзовой многоспектральной четырехканальной. Разрешение панхроматической системы составляет 2,1 м, многоспектральной – 10,5 м.

Следующим значимым шагом для направления космической техники в ОАО «Пеленг» стало создание системы оптико-электронного наблюдения с пространственным разрешением менее одного метра. В апреле 2014 года система в составе космического аппарата была успешно выведена на орбиту и продемонстрировала высокое качество снимков.

Мировая тенденция развития систем дистанционного зондирования Земли направлена в сторону улучшения пространственного разрешения и точности координатной привязки снимков. В настоящее время ОАО «Пеленг» проектирует ОЭА следующего поколения с разрешением на уровне мировых коммерческих аналогов – менее 0,5 м в панхроматическом канале и менее 2 м в многоспектральном, с возможностью координатной привязки снимков менее 10 м.

На предприятии также ведутся работы по созданию гиперспектральной аппаратуры, датчиков ориентации по звездам, лазерных дальномеров, оптико-электронных систем наблюдения для беспилотных летательных аппаратов.



**Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 620.179.147

**ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МЕАНДРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Кмита К.Ю.**

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

К одним из наиболее распространенных и эффективных методов неразрушающего контроля (НК), дефектоскопии и исследования электропроводящих материалов и изделий относится метод вихретокового контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля внешнего источника с электромагнитным полем вихревых токов (ВТ), возбуждаемых в объекте контроля переменным магнитным полем [1]. Возбуждение ВТ в материале производится с помощью вихретокового преобразователя (ВТП), от параметров, технических характеристик и конструкции которого зависят эффективность и достоверность получаемых результатов.

В последнее время все большее распространение получают плоские меандровые вихретоковые преобразователи (МВП) накладного типа на гибкой основе, представляющие собой устройства с повторяющимися токопроводящими элементами в виде линий, напоминающих меандр.

Технология создания МВП, получившая название MWM (Meandr Winding Magnetometr), получила широкое развитие для решения различных задач НК и дефектоскопии поверхностных и нанесенных слоев в проводящих материалах [2]. Такие плоские структуры позволяют повысить уровень сигнала, за счет более плотного прилегания к образцу и расширить функциональные возможности вихретокового метода.

Цель работы – разработка, изготовление по технологии MWM и испытание МВП, оптимизация электрических и конструктивных параметров, изучение возможности повышения чувствительности к различным свойствам проводящих материалов, включая немагнитные, магнитные и композиционные (слабопроводящие).

Использовались различные типы и конструкции изготовленных в ИПФ НАН Беларуси МВП, отличающихся габаритами, толщиной пленочного основания, сечением и подключением электрических контуров катушек возбуждения и регистрации, компоновкой и количеством одинарных МВП в матричном преобразователе, а также индуктивностью, реактивным, активным и комплексным сопротивлением [3, 4]. Особое внимание уделено матричным МВП, имеющим преимущество в надежности, производительности и воспроизводимости выявления дефектов.

На рис. 1 представлены примеры классических схем одинарного и двух матричных МВП, состоящих из четырех одинарных датчиков.

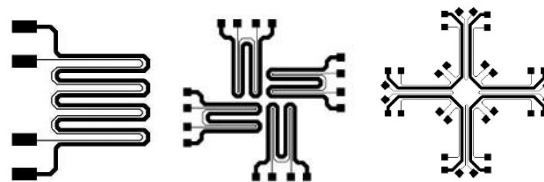


Рисунок 1 – Пример различных схем одинарного и матричного меандрового вихретокового преобразователя

На рисунке 2 в качестве примера показан внешний вид созданных в Институте макетов одинарного и 2-х матричных плоских МВП. Общая толщина одной партии изготовленных МВП составляла 0,12 мм (толщина подложки из полиимиды – 0,1 мм), второй – 0,19 мм.

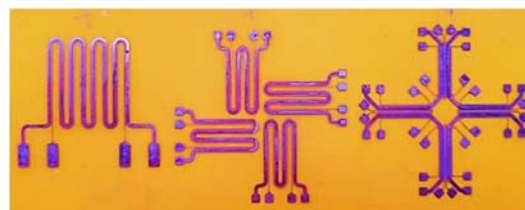


Рисунок 2 – Фотография внешнего вида изготовленных макетов на пленке одинарного и двух типов матричного МВП

Испытания МВП на различных режимах возбуждения и регистрации ВТ производились на экспериментальной лабораторной установке. Возбудителем ВТ в исследуемом материале являлся переменный синусоидальный ток от генератора с различными амплитудами тока возбуждения в диапазоне от 20 кГц до 3–5 МГц. Измерение ВТ производилось с помощью высокочастотного усилителя и измерительного прибора. В связи с высокой чувствительностью ВТ к зазору между материалом и МВП при измерении ВТ использовались две схемы установки МВП на образец. По первому варианту образец устанавливался на поверхность МВП с помощью вертикального механизма перемещения образца вплотную к преобразователю, второй – основан на установке образца на подставке и перемещающемся вертикально к нему МВП.

Испытания и исследования МВП производились на разных классах и группах проводящих материалов различных форм и размеров:

а) металлических материалах немагнитного класса (цветные металлы и сплавы – Cu, Al, Д16Т, БрБ2, 08Х18Н10, Ti, Pb и др.);

б) металлических материалах магнитного класса – Ст. 3, Э52 и др.;

в) магнитомягких ферритов;

г) слабопроводящих композиционных материалах системы «углерод-углерод» (УУКМ).

В табл. 1 для примера приведены значения удельного электросопротивления ( $\rho$ ) ряда исследуемых образцов материалов и соответствующие им уровни ВТ, полученные матричным МВП. На рис. 3 показаны зависимости вихрекового сигнала одинарного МВП от вида материала, из которого видна четкая взаимосвязь между значением ВТ и  $\rho$  исследуемых образцов.

Таблица 1 – Значения  $\rho$  и ВТ для ряда исследуемых материалов (частота тока возбуждения = 220 кГц)

| Материал                          | Удельное электросопротивление, $\rho$ , Ом мм <sup>2</sup> /м | Уровень ВТ (ЭДС), $\Delta U_{\text{вк}}$ , В |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Медь (Cu)                         | 0,018                                                         | 1,85                                         |
| Алюминий (Al)                     | 0,028                                                         | 1,68                                         |
| Дуралюминий (Д16Т)                | 0,073                                                         | 1,7                                          |
| Берилл. бронза (БрБ2)             | 0,08                                                          | 1,43                                         |
| Нерж. нем. сталь                  | ≈0,11                                                         | 0,98                                         |
| Свинец (Pb)                       | 0,22                                                          | 0,48                                         |
| Углепластик (УУКМ <sub>1</sub> )* | ≈ 2                                                           | 0,28                                         |
| Углепластик (УУКМ <sub>2</sub> )* | ≈ 2                                                           | 0,38                                         |
| Углепластик (УУКМ <sub>3</sub> )* | ≈ 2                                                           | 0,48                                         |

\*Образцы предоставлены зав. лаб. № 9 Майоровым А.Л

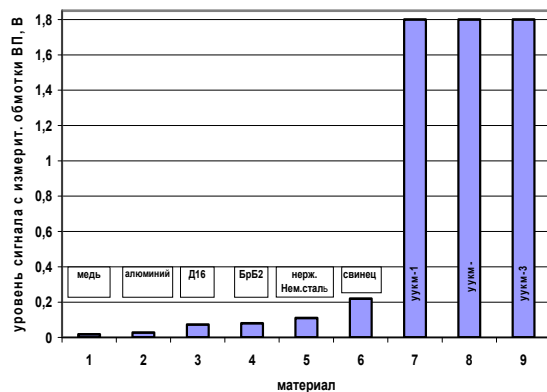


Рисунок 3 – Зависимость сигнала матричного МВП от удельного электросопротивления для различных немагнитных проводящих материалов

На рис. 4 в виде иллюстрации испытаний датчиков представлены результаты влияния частоты тока в катушке возбуждения на сигнал матричного МВП для образцов меди и электро-технической стали, из которого следует,

что наиболее оптимальными для получения максимальных значений ВТ являются частоты возбуждения в области от 1 до 2, 5 МГц.

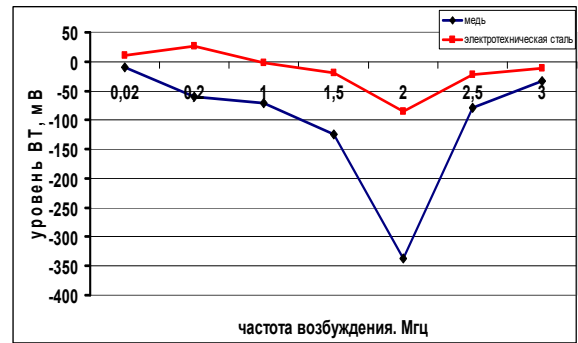


Рисунок 4 – Влияние частоты возбуждения на уровень вихрекового сигнала в матричном МВП для образцов меди и электро-технической стали

Таким образом:

– изготовлены и испытаны плоские МВП различных конструкций и типоразмеров с применением новых технологий;

– получены экспериментальные зависимости влияния удельного электросопротивления, частоты и амплитуды тока возбуждения на уровень ВТ;

– установлено, что исследуемые МВП обладают высокой чувствительностью к удельному электросопротивлению и универсальностью; объектами исследования могут быть практически любые проводящие изделия; на сигнал вихрековой матрицы влияют не только частота и амплитуда тока возбуждения, но и компоновка составляющих ее датчиков, схем подключения катушек и их импеданс [4].

В ИПФ НАН Беларуси продолжают работы по разработке, конструированию и исследованию разных типов МВП для контроля, диагностики и дефектоскопии проводящих материалов.

### Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. – М. : Машиностроение, 2003. – 688 с.
2. N. Goldfine, V. Zilberstein, Sch. Cardill, D. Schlicker MWM-Array Eddy Current Sensors for Detection of Cracks in Regions with Fretting Damage // ASNT Materials Evaluation, Vol. 60, – № 7 – 2002.
3. Венгринович В.Л., Ануфриева Г.Н. Технология получения гибких датчиков для вихрекового контроля // материалы межд. НТК «Приборостроение–2012», 21–23 ноября 2012, Минск. – С. 29–30.
4. Бусько В.Н., Венгринович В.Л. Повышение уровня сигнала матричного меандрового вихрекового преобразователя // материалы междунар. НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», 27–28 апреля 2018, Могилев, – С. 346–347.

УДК 621.891

**МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ**

**Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пеглицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Важное значение в технологии интегральных микросхем, особенно на основе субмикронных слоев, имеет не только контроль готовых приборных структур, но и исходных материалов и слоев, используемых в конкретных технологических операциях [1]. Одним из основных параметров, характеризующих качество приповерхностных слоев полупроводниковых пластин является однородность пространственного распределения их электрофизических параметров, например, поверхностного сопротивления, по площади пластины.

Бесконтактные измерения удельного электрического сопротивления  $\rho_s$  полупроводниковых слоев основаны на использовании особенностей пространственного распределения потенциала поверхности, связанных с генерацией неравновесных носителей заряда и формированием продольной фото-ЭДС. Освещение полупроводникового  $p-n$ -перехода приводит к возникновению между двумя областями перехода поперечной фото-ЭДС. В случае неравномерного или локализованного освещения, возникает также напряжение, параллельное переходу (продольный фотоэффект). Это явление обусловлено эффектом реинжекции носителей заряда.

При локальном освещении полупроводника с мелким переходом (0,1-5 мкм), сформированным в процессе диффузии или ионного легирования [2] генерируется вентильная фото-ЭДС ( $J_{PV}$ ). По мере удаления от области генерации избыточных носителей заряда их концентрация падает, и на некотором фиксированном расстоянии от области освещения потенциал поверхности составит  $V_2$ . Разность значений  $V_1-V_2$  определяется процессами растекания тока и зависит от удельного сопротивления полупроводникового слоя. Конструкция электрометрического зонда (рисунок 1) образована двумя емкостными электродами, один из которых выполнен полупрозрачным и через него осуществляется ввод модулированного по амплитуде луча света.

Для нахождения аналитической связи между контролируемым параметром (удельным сопротивлением  $\rho_s$ ) и измеряемыми в методе напряжениями фото-ЭДС, необходимо сначала решить задачу, связанную с протеканием тока через отдельный точечный зонд в конфигурации полупроводникового образца полубесконечного объема. Так как пространственное распределение электрического потенциала в образце имеет сферическую симметрию, то для его определения достаточно решить уравнение Лапласа в сферической системе координат, в котором

оставлен лишь член, зависящий от геометрических характеристик. Определение удельного сопротивления тонкой пластины, как и образца полубесконечного объема с границей, сводится к вычислению поправочной функции. Однако ее расчет для тонкой пластины более сложен, так как тонкая пластина определенной геометрической формы имеет большое число поверхностей и для каждой из них должно выполняться соответствующее граничное условие.



Рисунок 1 – Измерение поверхностного сопротивления двухэлектродным электрометрическим зондом

Эквивалентная схема формирования сопротивления тонкого слоя барьерной структуры приведена на рисунке 2.

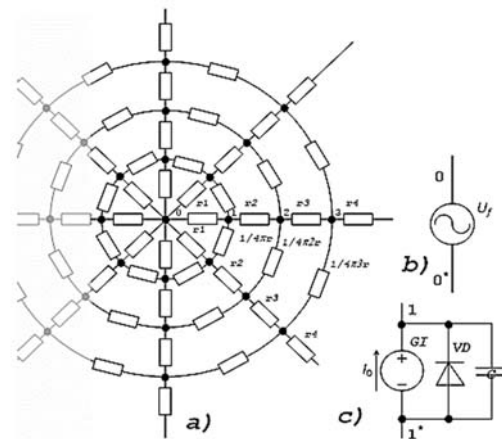


Рисунок 2 – Эквивалентная схема полупроводникового слоя при контроле точечным зондом

В точке 0 при освещении образца точечным источником света формируется барьерная фото-ЭДС (рисунок 2, b), которая может быть измерена бесконтактными конденсаторными методами [3]. Каждый узел схемы образован источником тока утечки  $p-n$  перехода и его емкостью

(рисунок 2, с), и связан между собой сопротивлениями растекания  $r_i$ . Точка 0 находится на поверхности, точка 0\* – под точкой 0, на границе раздела слоев, формирующих  $p-n$  переход. Ввиду эквипотенциальности равноудаленных от зонда узлов, т. е. узлов, имеющих одинаковые индексы, двумерная эквивалентная схема (рисунок 2) может быть преобразована в одномерную схему (рисунок 3).

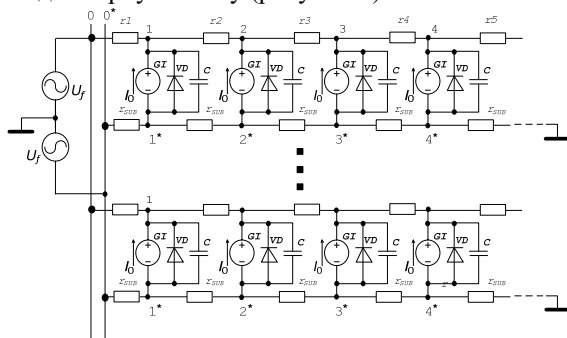


Рисунок 3 – Одномерная эквивалентная схема полупроводникового слоя при контроле точечным зондом

Модель метода измерения совместно с эквивалентными схемами и способами формирования измерительных сигналов образует и ряд выражений, определяющих соотношения между параметрами структуры и измерительного сигнала конденсаторной ячейки чувствительного элемента

$$V = Ae^{-kx},$$

где  $k$  – комплексная функция, определяющая фазовый сдвиг измерительных сигналов и зависящая от параметров эквивалентной схемы измерительной ячейки:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega C_S}{G}.$$

Измеряемые бесконтактным способом изменения поверхностного потенциала

$$\frac{V_2}{V_1} = f(R, C, G, r_1, r_2, F).$$

Таким образом, определив в представленном методе параметры фото-ЭДС (амплитуда и фазовый сдвиг) на различном удалении от места освещения структуры (точка 0 на эквивалентной схеме), можно бесконтактным способом опре-

делить такие параметры структуры как удельное сопротивление приповерхностного слоя, ток утечки  $p-n$  перехода, емкость  $p-n$  перехода.

В полупроводниках различают пять основных типов оптического поглощения, из которых наиболее существенными, в данном случае, являются два механизма: собственное поглощение и поглощение на свободных носителях. Параметры оптического излучения выбирают в зависимости от свойств материала полупроводниковых слоев и глубины залегания границы  $p-n$  перехода, формируемого при эпитаксии, диффузии или ионном легировании.

Каждое из измерений пространственно локализовано, и, повторив их для нескольких точек, при перемещении оптико-электронного зонда над поверхностью пластины кремния (сканировании) можно сформировать карту пространственного распределения измеряемых параметров.

Таким образом, данная модификация метода сопротивления растекания фото-ЭДС барьерной структуры при локальном фото-возбуждении неравновесных носителей заряда излучением из области собственного поглощения может использоваться для бесконтактного измерения удельного сопротивления барьерного слоя.

#### Литература

1. Горлов, М.И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Д.Л. Ануфриев. – Мн. : Бел. наука, 2006. – 367 с.
2. Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, В.А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2007. – 224 с.
3. Жарин, А.Л. Методы зондовой электротометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов Перспективные материалы и технологии: монография в 2 т. / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский. – Витебск : Изд-во ВГТУ, 2015. – Т. 1. – 398 с.

УДК 620.179.14/15

### УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ВИНТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ДЕНТАЛЬНЫЙ ИМПЛАНТАТ-АБАТМЕНТ» ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ Бусько В.Н.<sup>1</sup>, Рубникович С.П.<sup>2</sup>, Прялкин С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГУО «Белорусская медицинская академия последипломного образования», Минск, Республика Беларусь

Дентальные внутрикостные имплантаты, применяемые в стоматологии, по конструкции разделяются на две большие группы: неразборные (моноконтные, однокомпонентные) и разборные (двухкомпонентные). Наиболее широко в практи-

ческой стоматологии применяются двухкомпонентные системы дентальных имплантатов. Разборные дентальные имплантаты имеют в своем составе внутрикостную часть (дентальный имплантат) и на костную представленную абатмен-

тами различных модификаций. У неразборных дентальных имплантатов внутрикостная часть и абатмент соединены монолитно. Соединение разборного дентального имплантата и абатмента бывает двух типов – плоскостное (цилиндрическое) и коническое [1]. Как в цилиндрическом типе соединения, так и в коническом абатмент к дентальному имплантату фиксируется при помощи винта. В данном типе соединения винт зажимается с заданным усилием порядка 20–40 Н/см под контролем динамометрического ключа. При функционировании ортопедических конструкций с опорой на дентальные имплантаты в полости рта винтовое соединение дентального имплантата и абатмента ослабляется. Исторически ранее появилось плоскостное (цилиндрическое) соединение, представленное наружным и внутренним шестигранником. Коническое соединение было разработано несколько позднее и является более современным соединением, нежели цилиндрическое.

Цель работы – разработка и изготовление специального устройства для исследования прочности винтового соединения системы «дентальный имплантат – абатмент» при циклических нагрузках, имитирующих функциональные нагрузки в полости рта.

Наибольший интерес для исследования представляют силовые нагрузки, которые направлены под углом к длинной оси дентального имплантата, как при боковых движениях нижней челюсти во время жевания.

При выполнении работы решался ряд технических задач [2]. Необходимо было, чтобы нагружение ортопедической конструкции осуществлялось под углом  $\alpha$  в диапазоне от  $22,5^\circ$  до  $45^\circ$  относительно направления нагрузки, а для повышения достоверности полученных данных и создания равенства условий для образцов необходимо проводить механические испытания одновременно для нескольких образцов.

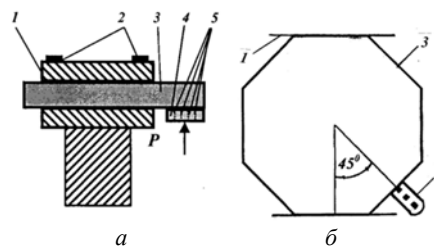
Для обеспечения указанных требований и условий испытания системы «дентальный имплантат – абатмент» на прочность винтового соединения были разработаны и изготовлены специальные носители, с укрепленными в них дентальными имплантатами в количестве 4-х штук. К дентальным имплантатам фиксировались абатменты посредством винтового соединения. На абатменты были изготовлены ортопедические конструкции из стали овальной формы для циклического нагружения подшипником качения.

Для соблюдения необходимого угла воздействия нагрузки на носитель с имплантатами был изготовлен носитель в виде восьми- и шестнадцатигранника. Нагружения проводили под углом  $\alpha_1 = 45^\circ$  и  $\alpha_2 = 22,5^\circ$  к создаваемому усилию соответственно. При изменении количества циклов нагружения  $N$  с помощью динамометрического ключа измерялся момент зажатия

фиксирующих винтов абатментов ортопедической конструкции. Изменение степени зажатия винтов абатментов свидетельствует об ослаблении прочности винтового соединения «дентальный имплантат – абатмент».

Пример конструкции носителя в форме восьмигранника и ортопедической конструкции овальной формы, а также направление действия нагрузки  $P$  на носитель представлены в двух проекциях на рис. 1, а и б. На рис. 2 – внешний вид носителя и ортопедической конструкции. Носитель в виде восьмигранника изготовлен из стали длиной 120 мм и высотой каждой грани 30 мм, на одной из граней которого формировались ложа для фиксации дентальных имплантатов на которые впоследствии устанавливалась ортопедическая конструкция размером 25x10x12 мм из кобальт-хромовой стали. Форма поверхности обоймы с образцами, на которую воздействует под углом нагрузка  $P$ , имеет вид овала.

Дентальные имплантаты размером 3,75\*11,5 и 4,2\*11,5 фиксировались в носителе в специально сформированном ложе посредством композиционного фиксирующего материала химического отверждения.



1 – узел защемления, 2 – болты крепления, 3 – носитель, 4, 5 – ортопедическая конструкция овальной формы,  $P$  – направление действия нагрузки (силовозбудитель); а – схема крепления носителя и ортопедической конструкции; б – восьмигранный носитель и ортопедическая конструкция

Рисунок 1 – Фиксатор и обойма с образцами в узле защемления установки для исследования усталостной прочности



Рисунок 2 – Внешний вид носителя в виде восьмигранника и установленной ортопедической конструкции

На зафиксированные дентальные имплантаты подбирались абатменты с высотой шейки 1 мм и изготавливалась ортопедическая конструкция из кобальт-хромовой стали овальной формы. Усилие зажатия фиксирующих винтов

контролировалось с помощью динамометрического ключа типа МТ-R1040 (в Н/см) с точно заданным крутящим моментом затяжки  $M$ . Исследование прочности соединения в системе «дентальный имплантат-абатмент» проводили на малогабаритной лабораторной установке [3], разработанной и изготовленной в ИПФ НАН Беларуси и предназначенной для механических испытаний плоских образцов из ферромагнитных материалов. Принцип работы установки основан на циклическом нагружении свободного конца консольно-защемленного образца специальным силовым элементом в виде подшипника качения. Для исследования прочности винтового соединения в системе «дентальный имплантат-абатмент» усталости узел заземления установки был усовершенствован.

В результате нагружения силовозбудителем незащемленного конца носителя 3 и ортопедической конструкции 4 при постоянной амплитуде напряжений  $\sigma$ , равной ориентировочно 120 МПа, с ростом  $N$  происходит накопление усталостной повреждаемости, приводящее к снижению прочностных характеристик в системе «дентальный имплантат-абатмент» и ослаблению крепления абатментов ортопедической конструкции 4. Выбранное значение создаваемых напряжений в системе «дентальный имплантат-абатмент» рассчитывалось по прогибу конца фиксатора, измеренного с помощью индикатора перемещения часового типа или с помощью электронного штангенциркуля. Характеризующий момент  $M$  затяжки фиксирующих винтов абатментов, или усилие, а также количество циклов нагружения  $N$ , являются количественными мерами ослабления винтовой фиксации в системе «дентальный имплантат-абатмент» имеющейся ортопедической конструкции 4.

Испытания показали работоспособность и эффективность предложенного устройства и методики исследования прочности винтового соединения системы «дентальный имплантат-абатмент» на усталость при изменении ориентации и угла направления нагрузки, степени затягивания фиксирующих винтов абатментов и количества циклов нагружения.

Выводы:

– реализована методика проведения усталостных испытаний винтовых соединений в системе «дентальный имплантат-абатмент», позволяющая моделировать реальные условия функционирования ортопедической конструкции в полости рта;

– изготовлены специальные носители в виде восьми- и шестнадцатигранника с ортопедическими конструкциями установленными в них под углом  $22,5^\circ$  и  $45^\circ$  относительно направления действия приложенной нагрузки к ним;

– предварительные испытания устройства показали работоспособность и эффективность при исследовании прочности винтового соединения в системе «дентальный имплантат-абатмент» в зависимости от направления угла действия нагрузки на ортопедические конструкции.

#### Литература

1. Рубникович, С.П., Прялкин, С.В. Использование мезоструктур при изготовлении зубных протезов с опорой на дентальные имплантаты: *Стоматолог*, Минск, 2016. – №2 (21). – С.62–63.
2. Лахтин, Ю.М., Леонтьева, Н.М. Материаловедение Учебн. для ВУЗов. М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов // *Приборы и техника эксперимента*, 2011. – № 1. – С. 165–167.

УДК 535-3, 535.314

#### ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЗЫ КУМАХОВА Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

В некоторых из устройств рентгеновской техники возникает необходимость направить рентгеновский пучок на объект, который удален на относительно большое расстояние от источника излучения. Как правило, для этих целей используется коллиматор, что, однако, приводит к потере интенсивности пучка. Если требуется получить пучок микронных размеров, то для формирования пучка можно использовать многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы [1]. Для рентгеновских пучков диаметром в сотни микрометров указанные линзы не эффективны, поскольку их апертура не превышает значение порядка

100 мкм, например, для фотонов с энергией 8 кэВ. Для этих целей перспективно использовать поликапиллярные линзы Кумахова [2]. Линзы Кумахова состоят из большого числа изогнутых специальным образом стеклянных микрокапилляров, по которым рентгеновские лучи распространяются в режиме полного внешнего отражения – как в оптических волноводах. Указанные линзы имеют апертуры в несколько миллиметров и позволяют сфокусировать рентгеновские лучи в пятно размеров в 50–500 мкм на расстоянии в 20–80 см от источника излучения.

Нами разработана рентгенооптическая система фокусировки рентгеновского излучения с использованием линзы Кумахова. Предполагается, что указанная система окажется эффективной для разрабатываемого нами сканера обратного рассеяния [3], в котором объект сканируется рентгеновским пучком диаметром около 1 мм, а детектор регистрирует интенсивность обратнорассеянного рентгеновского пучка, при этом детектор расположен со стороны источника излучения.

В состав разработанной системы входят: источник рентгеновского излучения, линза Кумахова, двумерная цифровая рентгеновская камера для визуализации рентгеновского пучка, объект исследования. Структурная схема стенда показана на рисунке 1. Фотография стенда показана на рисунке 2. Рентгеновское излучение от источника проходит через линзу Кумахова и фокусируется на исследуемом объекте. Рентгеновский пучок в месте расположения объекта регистрируется рентгеновской камерой, и изображение сечения пучка выводится на экран монитора компьютера.

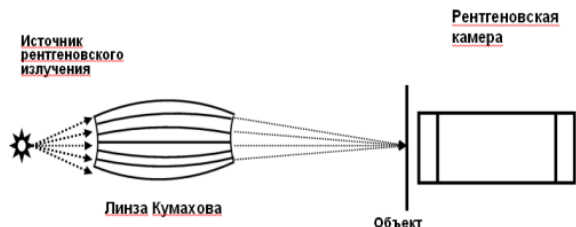


Рисунок 1 – Структурная схема стенда фокусировки и регистрации рентгеновского излучения

Получены изображения сфокусированного линзой Кумахова рентгеновского пучка. Фокусное расстояние линзы Кумахова составляет 152 мм для фотонов с энергией 8 кэВ. Перед камерой расположена металлическая сетка с диаметром отверстия 250 мкм. Диаметр фокусного пятна рентгеновского излучения – порядка 1 мм. Сетка используется как дополнительное устройство для определения размера пучка. На рисунке 3 показаны полученные изображения пучка и сетки, освещенной сфокусированным рентгеновским пучком.



Рисунок 2 – Фотография стенда для фокусировки рентгеновского излучения. 1 – рентгеновская камера; 2 – сетка; 3 – линза Кумахова в гониометре; 4 – источник рентгеновского излучения

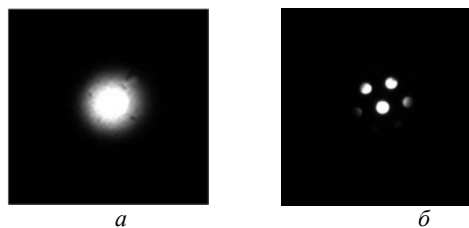


Рисунок 3 – а) изображение сфокусированного рентгеновского пучка; б) теневое изображение металлической сетки, освещенной рентгеновским пучком

Разработанная рентгенооптическая система использовалась для определения интенсивности обратнорассеянного рентгеновского пучка от различных материалов. Структурная схема стенда для исследований показана на рисунке 4. В состав стенда входят рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом, линза Кумахова, сцинтилляционный детектор со счетчиком импульсов. Рабочее напряжение на аноде трубки регулируется от 10 до 40 кВ, анодный ток – от 2 до 14 мА. Рентгеновское излучение от источника проходит через линзу Кумахова и фокусируется на исследуемом объекте. Количество отраженных импульсов регистрируется сцинтилляционным детектором и подсчитывается счетчиком импульсов. Образцы располагались на расстоянии 152 мм от линзы Кумахова. Диаметр фокусного пятна рентгеновского излучения составлял порядка 1 мм. В качестве образцов использовались пластины из дюралюминия, свинца, пластика и железа.

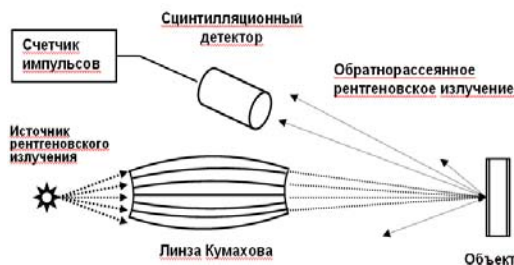


Рисунок 4 – Структурная схема стенда измерения интенсивности обратнорассеянного рентгеновского излучения

Определена зависимость интенсивности обратнорассеянного рентгеновского излучения от материала образца. Полученные данные приведены в таблице.

Таблица – Интенсивность обратнорассеянного рентгеновского пучка от различных материалов

| № п/п | Наименование материала | Напряжение, сила тока анода рентгеновской трубки / Интенсивность обратнорассеянного рентгеновского пучка, имп/с |             |
|-------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|       |                        | 16 кэВ, 2мА                                                                                                     | 32 кэВ, 2мА |
| 1     | Дюралюминий            | 20 000                                                                                                          | 72000       |
| 2     | Свинец                 | 22000                                                                                                           | 74000       |
| 3     | Пластик                | 42000                                                                                                           | 130000      |
| 4     | Железо                 | 150000                                                                                                          | 350000      |

Из таблицы видно, что интенсивность обратнорассеянного пучка максимальна от железа, что, по-видимому, связано с флуоресценцией атомов железа, которые эффективно возбуждаются рентгеновской трубкой с медным анодом.

Использование рентгенооптических элементов позволяет получать первичный пучок рентгеновского излучения с заданными параметрами, что позволяет повысить разрешающую способность системы регистрации обратнорассеянного рентгеновского излучения.

### Литература

1. Дудчик, Ю.И. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования

микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008. – № 2 – С. 26–30.

2. Kumakhov M.A. Channeling of photons and new x-ray optics, Nucl.Instr& Meth., 1990, B48,1–4, pp. 283–286.

3. Сканер для получения изображения объектов в обратнорассеянных рентгеновских лучах / Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, П.В. Кучинский, А.Н. Новик, М.И. Новик, И.В. Белый, Крекотень О.В. // Материалы девятой Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2016». – Минск, БНТУ, 2017. – С. 50–51.

УДК 621.3.049.77: 681.586

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А.

ОАО «МНИПИ», Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты разработки и исследования информационно-измерительной системы (ИИС) на базе цифровых функциональных электронных модулей (ФЭМ).

Для реализации ИИС был выбран принцип построения архитектуры модульных устройств [1], предусматривающий следующие особенности: многоканальная обработка; микропроцессорная и микроконтроллерная организация; обеспечение независимости метрологических характеристик каналов измерения от внешних каналов обмена информацией; структуризация вычислительного процесса, основанная на выделении проблемных, управляющих и коммуникационных процедур аппаратно-программная поддержка основных процедур; модульная структура программных и аппаратных средств; специализация модулей на реализацию процессов; увеличение объема и глубины самоконтроля; программируемость архитектуры ИИС; многоуровневая адаптируемость к изменяемым требованиям, благодаря возможности модернизации и развития прикладного и системного программного обеспечения, гибкого наращивания аппаратных средств, а также возможности модернизации аппаратных модулей и их замены более совершенными устройствами.

Структурная схема ИИС представлена на рисунке 1.

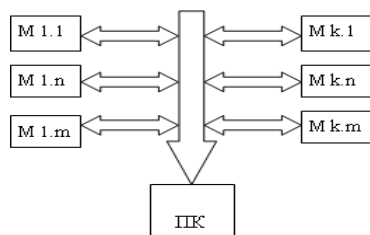


Рисунок 1 – Структурная схема ИИС

В данной схеме архитектура ИИС формируется в виде сетевых иерархических микрокомпьютерных объединений (M1.1,... M 1.n,... M 1m, ...M k.1,...M k.n,...M k.m) с распределенными базами данных и обработкой данных, считываемых с чувствительных элементов (датчиков) в реальном масштабе времени.

Такая структура ИИС обеспечивает ряд преимуществ:

- расширение числа функций, реализуемых в системах;

- углубление и усложнение обработки считываемых с датчиков данных, направленные на увеличение информативности формируемых результатов при сокращении объемов хранения малоинформативных данных;

- развитие объемов числовой обработки данных на иерархических уровнях системы, в том числе на первом уровне, на котором реализуется предварительная обработка сигналов датчиков;

- организацию сетевого протокола обмена данными по каналам обмена информацией;

- сокращение числа каналов передачи аналоговой информации в пользу цифровых каналов, обеспечивающее снижение чувствительности систем к внешним помехам;

- обеспечение независимости метрологических характеристик каналов измерения от внешних каналов обмена информацией;

- увеличение объема и глубины самоконтроля систем.

Исследования были проведены для ИИС в составе 8 ФЭМ для контроля дифференциального давления, объема газа, электропроводности растворов, оптической плотности растворов, освещенности, индукции постоянного магнитного поля, ускорения, расстояния.



ФЭМ были построены на базе 32 разрядных микроконтроллеров семейства ST на ядре ARM Cortex-M3 [2].

В качестве регистратора данных использовался персональный компьютер (ПК) Intel Pentium G 2.8 ГГц с характеристиками: объем ОЗУ не менее 2 Гбайт, разрешение экрана монитора не менее 10254×746 пикселей, наличие порта USB. Для функционирования ИИС было разработано специальное ПО «DIGITAL LABORATORY» на базе ОС Windows XP SP3, Windows Vista, Windows 7 SP1; платформа Microsoft .NET Framework 4 и специальное ПО для ФЭМ «Digital Sensors».

На рисунках 2–6 представлены результаты исследования ИИС в режимах контроля дифференциального давления (0 – 700 кПа); освещенности (0 – 65535 лк); индукции магнитного поля (- 0,8 – + 0,8 мТл); электропроводности растворов (0 – 5 мСм/см); расстояния (0,04 – 4,0 м).



Рисунок 2 – Информационное окно ПК в режиме контроля дифференциального давления



Рисунок 3 – Информационное окно ПК в режиме контроля освещенности



Рисунок 4 – Информационное окно ПК в режиме контроля индукции постоянного магнитного поля

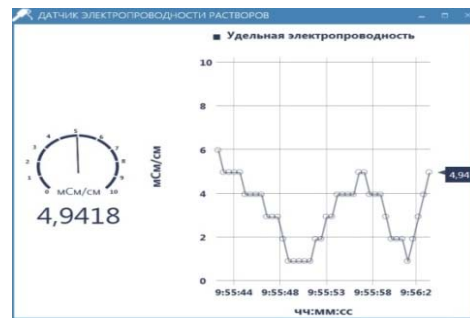


Рисунок 5 – Информационное окно ПК в режиме контроля электропроводности растворов

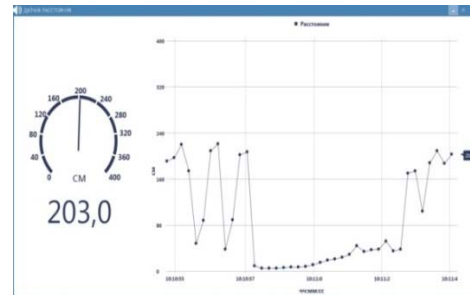


Рисунок 6 – Информационное окно ПК в режиме контроля расстояния

Разработанная ИИС предназначена для мониторинга и контроля параметров различных объектов и окружающей среды и может быть использована как для промышленного применения, так и для выполнения физических и химических экспериментов в научных и учебных лабораториях. Прикладное ПО обеспечивает математическую обработку полученных данных и их отображение на экране ПК в виде гистограмм, графиков, таблиц. Предложенное техническое решение повышает точность и наглядность выполнения экспериментов, предоставляет дополнительные возможности по автоматической обработке данных и анализу полученных результатов.

Основными преимуществами ИИС являются:

- возможность избирательного подключения ФЭМ в зависимости от решаемых задач;
- возможность реализации многоканального режима работы ИИС в реальном времени;
- возможность автоматизированного сбора и обработки данных при выполнении многочисленных измерений и экспериментов;
- возможность наращивания ФЭМ и программно-аппаратных средств системы;
- возможность изменения конфигурации ИИС в зависимости от требований потребителя.

#### Литература

1. Пьявченко О.Н., Панин А.Е., Мокров А.Е. Принципы построения и архитектура перспективных информационно-измерительных систем мониторинга, диагностики и управления на базе интеллектуальных датчиков. – электронный ресурс, режим доступа: <http://www.microsystems.ru/files/publ/>

2. Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Паршков А.В., Сушко В.А. Функциональный электронный модуль контроля линейных перемещений // Материалы 10-й Международной научно-

технической конференции «Приборостроение – 2017 г. Минск 1–3 ноября 2017 г. – Минск: БНТУ 2017. – С. 48–50.

УДК 620.178

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПОДАТЛИВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ ТВЕРДОМЕРОВ**

Рудницкий В.А., Зинькевич Н.В., Кутепов А.Ю., Гнутенко Е.В., Ланцман Г.А.

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Ни одно мероприятие по контролю и диагностике промышленных объектов не обходится без определения их физико-механических свойств. Особое место при оценке физико-механических свойств конструкций занимает измерение твердости. Данная характеристика имеет связь с прочностью, а также, при построении корреляционных зависимостей для отдельных видов материалов, с пределом текучести.

В нашей стране и за рубежом широко распространены портативные цифровые приборы, реализующие различные методы определения твердости. В зависимости от способа приложения нагрузки, портативные твердомеры подразделяются на статические и динамические. Статические твердомеры реализуют методы Бринелля, Виккерса или Роквелла, а динамические – метод отскока Лееба [1].

Целью работы являлось проведение сравнительного анализа точности измерения твердости податливых конструкций портативными приборами Krautkramer TIV, ИПМ1-А и динамическим твердомером Т-10 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Портативные твердомеры

Твердомер Krautkramer TIV реализует метод определения твердости по Виккерсу в единицах HV с возможностью перевода в единицы HB или HRC по стандартизованным таблицам. Прибор ИПМ1-А – твердомер, позволяющий регистрировать диаграмму вдавливания и определять динамическую твердость по Мейеру [2]. При этом измерения в работе проводились в 2-х вариантах: используя стандартные градуировки и с применением методики корректировки показаний твердости, разработанной специально для податливых конструкций [3]. Для оценки точности измерений портативных приборов проводилось сравнение с твердостью, полученной с помощью стационарного твердомера Бринелля ТШ-2М.

В качестве податливых конструкций были выбраны трубы с диаметром 172, 170, 148 и 108 мм (рисунок 2). Толщина стенки трубы варьировалась от 9,5 до 2 мм.



Рисунок 2 – Исследуемые образцы

Для исключения фактора недостаточной массы внутри трубы на консистентную смазку притиралась массивная цилиндрическая болванка. В таблице представлены усредненные по пяти измерениям результаты, полученные на трубах стационарным и портативными приборами.

Таблица – Показания портативных твердомеров

| Диаметр, мм | Толщина, мм | Твердость, НВ |     |      |                     |                    |
|-------------|-------------|---------------|-----|------|---------------------|--------------------|
|             |             | ТШ-2М         | TIV | T-10 | ИПМ-1А без методики | ИПМ-1А с методикой |
| 172         | Торец       | 202           | 206 | 198  | 195                 | 202                |
|             | 8,5         |               | 200 | 183  | 194                 | 201                |
|             | 7,5         |               | 204 | 184  | 193                 | 201                |
|             | 6,5         |               | 201 | 175  | 187                 | 196                |
|             | 5,5         |               | 197 | 165  | 183                 | 197                |
|             | 4,5         |               | 198 | 153  | 168                 | 192                |
| 170         | 3,5         | 202           | 125 | 151  | 196                 |                    |
|             | Торец       | 240           | 237 | 236  | 242                 | 243                |
|             | 9,5         |               | 239 | 230  | 227                 | 238                |
|             | 8,5         |               | 235 | 222  | 231                 | 241                |
|             | 7,5         |               | 239 | 212  | 226                 | 241                |
|             | 6,5         |               | 230 | 206  | 223                 | 238                |
| 5,5         | 236         |               | 203 | 220  | 238                 |                    |
| 148         | 4,5         | 235           | 189 | 217  | 235                 |                    |
|             | Торец       | 167           | 166 | 171  | 167                 | 167                |
|             | 7,5         |               | 167 | 142  | 156                 | 164                |
|             | 5,5         |               | 165 | 136  | 150                 | 163                |
|             | 4,5         |               | 164 | 131  | 143                 | 163                |
| 3,5         | 170         |               | 67  | 112  | 164                 |                    |
| 108         | Торец       | 174           | 176 | 159  | 165                 | 172                |
|             | 4           | 140           | 139 | 110  | 120                 | 137                |
|             | 3           |               | 150 | 95   | 94                  | 130                |
|             | 2           |               | 147 | 30   | 62                  | 131                |

На рисунке 3 представлены графики изменения показаний портативных приборов, реализующих различные методы измерения твердости на образцах труб с толщиной стенки от 9,5 мм и менее. Торце́ трубы в данном случае принимался как наиболее жесткий участок образца. На графиках он представлен крайней правой точкой, соответствующей толщине 10 мм. Для прибора ИПМ-1А на графиках также изображен размах твердости по пяти измерениям.

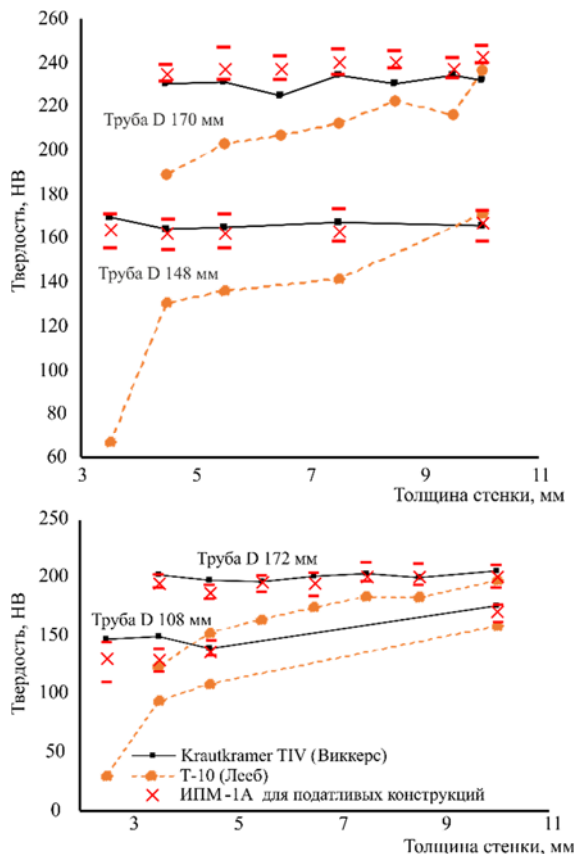


Рисунок 3 – Показания твердомеров на различных трубах

Сравнив показания приборов из таблицы и рисунка 3 можно сделать вывод о том, что динамический твердомер Т-10, реализующий метод отскока Лееба, не подходит для контроля податливых конструкций. Разница в показаниях между динамическим твердомером Т-10 и стационарным ТШ-2М при толщине стенки трубы менее 10 мм составила от 20 до 100 НВ. Прибор ИПМ-1А, при использовании алгоритмов расчета твердости Мейера по диаграмме вдавливания и стандартной градуировки, также мало применим к податливым конструкциям, хотя показания прибора менее подвержены влиянию жесткости конструкции, чем приборы, реализующие метод Лееба. Без применения разработанной методики [3] ошибка показаний твердости ИПМ-1А

на трубах с толщиной стенки менее 10 мм составила от 10 до 80 НВ.

Krautkramer TIV довольно точно определил твердость труб на различных толщинах стенки. Отклонение значений по 5 измерениям в сравнении с показаниями стационарного твердомера не превысила 10 НВ. Однако для достижения точных измерений потребовалось хорошо подготовить поверхность контролируемого образца.

ИПМ-1А, при использовании разработанной алгоритмов корректировки рассчитанной твердости для податливых конструкций не уступил по точности Krautkramer TIV. Ошибка по 5 измерениям, как и у TIV не превысила 10 НВ, что свидетельствует о работоспособности разработанной методики [3].

Таким образом при использовании динамических твердомеров, реализующих метод отскока по Леебу, для конструкций с ограниченной жесткостью необходимо проводить предварительную градуировку на образцах с известной твердостью, аналогичной жесткостью и массой, а не мерах твердости. В то время как разработанная методика, применимая как для приборов типа ИПМ-1А, так и для нового поколения твердомеров ТЩ-7, разработанных в Институте прикладной физики НАН Беларуси, позволяет проводить неразрушающий контроль непосредственно податливых конструкций типа труб, цистерн, сосудов высокого давления с толщиной стенки более 3 мм без предварительных градуировок.

Представляет интерес проведение дополнительных исследований для оценки возможности применения разработанной методики для контроля другого типа податливых конструкций: балки, фермы и др. В совокупности с проведенными исследованиями это позволит существенно расширить область применения портативных динамических твердомеров, регистрирующих диаграмму вдавливания.

### Литература

1. Лееб Д.К. определению характеристик твердости материала «L» по динамическому методу измерений «Eqoutip» / Д. Лееб. – V. 1. – № 583. – Bortichte, 1986
2. Рудницкий В.А. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В.А. Рудницкий, А.В. Рабцевич // Дефектоскопия – 1997. – № 4. – С. 79–86.
3. Крень А.П. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при измерении твердости / А.П. Крень, В.А. Рудницкий, Н.В. Зинькевич // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 4. – С. 38–45.

## METHOD OF CONTROL OF A SHAPE OF ELIPSOIDAL REFLECTORS ACCORDING TO DEVELOPED STAND

Kozlovskiy A.G., Bezuglyi M.A.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Usually, «reflector» in optics is a component part of a photometer with an efficient focus function of incoming light flux and with a following task of transferring it to a photosensitive element. This process has meaningful value, first of all, because of demands for a whole process of measuring during the experiments that requires extremely high accuracy, where the error is practically inadmissible, such as optics, lasers, aviation, astronomy, etc. Today, progressive development of modern technological solutions and capabilities of manufacture allows to use variety ways of production of reflectors, including the most popular such as using copying machines, CNC machines, methods based on replication process, printing on 3-D printers (with subsequent metal deposition on inner «working» surface of reflectors), and machines equipped with a special equipment [1].

Since the technology of obtaining reflectors is quite extensive therefore arises the question of their further control using a universal method of control of a shape of ellipsoidal reflectors. Therefore, for validation of recently manufactured reflectors for suitability and applicability; and for measuring basic optical characteristics of reflectors was developed a special technical equipment: system for control of parameters of the inner working surface of the mirror ellipsoid of rotation (one of the most common types among reflectors which are widely used in biomedical optics [2, 3]). The system is simple enough but effective and reliable. It allows to measure optical properties accurately and to perform other functions during the research or testing of ellipsoid in optical purposes.

The developed technical equipment consists of a source of radiation, an optical system, a coordinate photodetector and an prototype, which in this case is an ellipsoidal reflector.

Thus, a stand was designed according to this system [4], which allows to control and to determine the suitability of manufactured ellipsoid in workshops, factories and laboratories

Today, the problem of measurement and control of manufactured ellipsoid is not new, however still actual. The demand for control and measurement of the main optical characteristics of the reflectors, firstly, was determined in the late nineteenth and early twentieth centuries. Since then, many measurement tools have been appeared that allow to determine with certain precision all necessary optical parameters on the prototype, such as coefficient the transmission of light flux in the focuses of ellipsoid, however the designed compact system is unique, accurate and sophisticated with opportunity to adjust

optical system for better result during verification, research and experiments.

During research in the field of optics, mainly, two features play fundamental role. First one is accuracy of quality of surface of any manufactured prototype that has to be on extremely high level as it is used in this field of science; another one is using of correct method of control and measurement of a prototype following all technical requirements precisely.

Accuracy of control of object determines not only of the quality of item, but also by a possibility of using the product for certain optical purposes.

The designed stand allows to control a shape of ellipsoidal reflectors and ellipsoids that are widely used in photometry to study the optical properties of mud and biological media.

The stand includes a source of radiation, an optical system, a coordinate photodetector and a prototype.

The source of radiation is a laser emitter, such as a He-Ne laser with a rated power of 2 mW at a wavelength of 632.8 nm and a diameter of a beam of 1.4 mm.

The optical system is presented in the form of a reflecting mirror, as well as the possibility of installing any lenses up to 8 pieces (if there is a demand during the research). The mirror is placed at an angle of 45 ° to the source of radiation and to the prototype with the ability to accurately adjust the mirror relevant to degree, minute and even second thanks to a rotating knob with a scale [5].

The advantage of the charge-coupled device (CCD) of the coordinate photodetector is the high metrological characteristics (accuracy) and the ability to transfer data to a personal computer (PC) for further processing in specially designed software for different analysis of a database (DB).

The coordinate photodetector belongs to the primary converters, the principle of which is based on the application of drift charge carriers. It is characterized by a large steepness of the coordinate characteristic, a large dispersion ability (units and even dozens of micrometers) for a short length of the linear coordinate area (up to 1 mm) [6].

In this case, as a prototype is an ellipsoidal reflector or other type of an optical research sample, such as ellipsoids or spheroids.

The principle of operation of the system is as follows: from the source of radiation through the optical system passes prefabricated beam of light, which later goes to the working surface of the reflector. In this case, the test sample is fixed in a special cartridge with the possibility of manual rotation, depending on the need to study certain surface of the reflector to which the radiation is directed. Directed radiation proceeds from one focal point of the reflector

tor, reflects from the inner surface of reflector and falls into the second focus. Thus, the principle of the stand is based on the measurement and analysis of reflected light flux concentrating in the focus, from which it subsequently enters the coordinate photodetector and further it would transmit to the PC where it is processed and stored as a table in a DB.

The method of measurement, based on strictly following of safety precautions while working with lasers in laboratory rooms and research centers [7], contains seven next steps.

1. Preparatory. To check the whole equipment: a laser, a coordinate photodetector for serviceability. To wipe the elements of the optical system with a disposable soft paper cloth dampened with 70 % ethyl alcohol or another special liquid for optics.

2. Installation. To install and fix the test sample in a specially designed for this purpose cartridge. To check the possibility of smooth rotation of the reflector.

3. Power connection. To turn on PC and to run software. To supply with the power laser and a digital coordinate photo receiver.

4. Focusing. To direct the optical system in such a way that the light flux coming from the laser falls into the focus of the reflector. The angle of rotation of the mirror is determined by the scale. If necessary, to calibrate the laser and install additional lenses, but, firstly, TURN OFF THE LASER.

5. Experimental. To set the sample (special template) to measure the accuracy and suitability of the system.

6. Metric. To perform measurements of the prototype by rotating the cartridge with a hand.

7. Final. To save data to file on PC and to turn off laser power, PC and digital coordinate photodetector.

Further, to perform calculations using a special method of data processing in accordance with the aims of the research.

This stand with step-by-step instruction was developed in order to improve a process of verification of manufactured reflectors for validity. Moreover the designed system allows to simplify process of measure optical values using coordinate photodetector.

This stand can be used in training laboratories in universities, on factories, moreover in research centers.

### References

1. Bezuglyy M.O. Features of the manufacturing of ellipsoidal reflectors of photometers / M.O. Bezuglyy, I.I. Sinyavsky, N.V. Bezugla, A.G. Kozlovsky // *Vysn. National tech Unitary Enterprise of Ukraine «KPI». Ser Instrument making – 2016. – Voice over 52. – P. 76–81.*

2. M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk, «Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoid reflectors», *Devices and Methods of Measurements. 9 (1): 56–65, 2018.*

3. Bezuglyi M., N. Bezuglaya, and A. Viruchenko. «On the possibility of ellipsoidal photometry and Monte Carlo simulation to spatial analysis of biological media». *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2017 IEEE 37th International Conference on. IEEE, 2017.*

4. Bezugly M.O., Lynučheva A.V., Bezugla N.V., Byk M.V., Kostiuk S.A. Control of the form of ellipsoidal reflectors of biomedical photometers / // *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute". Series: Instrumentation. – 2017 – V. 53 (1). – P. 62–69.*

5. Kucherenko O.K. Principles of designing benches for measuring OPF focusing units of opto-technology // *Collection of scientific works of international scientific conference «Electronic component base, state and prospects of development». Kharkiv, Kharkov National University of Radio Electronics (KNURE). – 2008. – P. 289–290.*

6. Lytvyn I.S. Influence of the first converters optical radiation and their characteristics on effectiveness of image processing. *Ternopil National Economic University, Department of Automated Systems and Programming, 2007. P. 64–70.*

7. Annex. Safety rules for lasers. [Electronic resource]. – Access mode: <http://cde.kpi.kharkov.ua/Inde/Practicum/Appl.pdf>.

УДК 614.842

### РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОРОСИТЕЛЯМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДАЧИ ОГNETУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА

Костенко Е.Р.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время при тушении спринклерной системой пожаротушения помещения существуют слепые зоны (мертвые зоны). Слепая зона (мертвая зона) – это небольшая площадь помещения, в которой не соблюдается требуемая интенсивность подачи огнетушащего вещества (ОВ) от одного оросителя (рисунок 1).

Данная ситуация противоречит пункту 6.7 ТКП 45-2.02-317-2018 [1]. Требуемую интенсивность орошения спринклерной установкой по-

жаротушения следует предусматривать каждым оросителем в каждой точке защищаемой площади (без учёта суммирования интенсивностей на пересекающихся участках защищаемой площади соседними оросителями с учётом фактических карт орошения для обеспечения нормативной интенсивности). Введённый в действие на территории Республики Беларусь ТКП EN 12845:2015 [2], который идентичен международному стандарту EN 12845:2015 [3], имеет ряд недоработок. Единицы

измерения не соответствуют системе СИ. Так же согласно ТКП EN 12845:2015 [2] интенсивность подачи воды необходимо будет рассчитывать, как общий расход воды (выраженный в литрах в минуту), который обеспечивает группу из четырех спринклеров, расположенных в непосредственной близости друг от друга, разделенный на площадь (выраженную в квадратных метрах), которую закрывают эти четыре спринклера. Если количество спринклеров, которые закрывают площадь орошения, меньше четырёх, то интенсивность подачи воды необходимо рассчитывать, как отношение наименьшего значения расхода воды, которое обеспечивает любой спринклер, к площади, которую он закрывает.

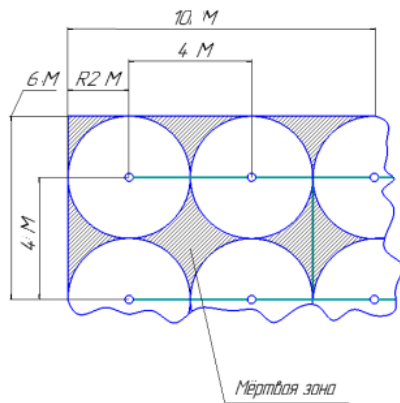


Рисунок 1 – Слепая зона

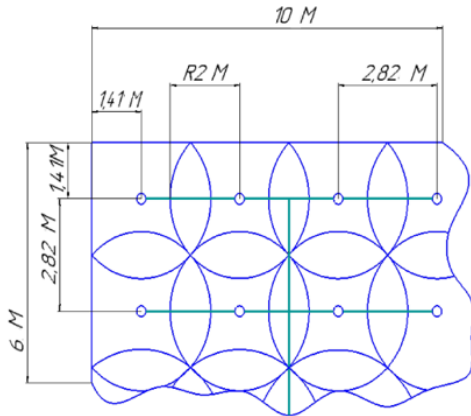


Рисунок 2 – Расположение оросителей с учётом минимально необходимого расстояния между оросителями

В проделанной работе сделан вывод об оптимальном варианте расстояния между оросителями различных марок, представленных на рынке Беларуси. Осуществлён анализ параметров оросителей «СпецАвтоматика», «Аква-Гефест» и «ТУСО».

Для оценки эффективности расчёта были разработаны таблицы, в которых представлены имеющиеся и определены недостающие параметры оросителей. В процессе анализа разработанных таблиц осуществлён выбор оросителей, которые наиболее экономически выгодны для

использования в процессе проектирования спринклерных систем пожаротушения. Разработаны таблицы с расчётными параметрами работы оросителей.

В процессе расчёта параметров оросителей установлен показатель «Перерасход воды, %» для каждого оросителя. Показатель «Перерасхода воды, %» заключается в том, что давление, определённое по эюре орошения оросителя, для обеспечения минимальной нормативной интенсивности может быть ниже давления, при котором достигается раскрытие карты орошения. При минимальном давлении, приводящем к раскрытию карты орошения, интенсивность орошения выше нормативной.

С помощью найденного параметра разработаны рекомендации по наиболее выгодному использованию оросителей в спринклерных системах пожаротушения. Наиболее благоприятные для использования в спринклерных системах пожаротушения являются оросители производителей «Аква-Гефест» и «ТУСО».

В процессе выполнения работы уточнена геометрия слепых зон. Осуществлён расчёт, в ходе которого найдено минимально необходимое, расстояния между оросителями (рисунок 2). Сформированы опорные таблицы трассировки оросителей, в которых представлены оптимальные расстояния между оросителями (рисунок 3). Сделан вывод о том, что при одновременной работе четырёх оросителей спринклерной системы пожаротушения, расположенных на расстояниях, соответствующих опорным таблицам, нецелесообразно ограничивать защищаемую площадь одним оросителем.

Таблица – Опорная таблица для трассировки оросителей «Аква-Гефест»

| Диаметр выходного отверстия оросителя, мм | Нормативная интенсивность орошения | Расход воды | Радиус | Расстояние от оросителя до стенки, м | Расстояние между оросителями, м |
|-------------------------------------------|------------------------------------|-------------|--------|--------------------------------------|---------------------------------|
| 9,4                                       | 0,08                               | 1,34        | 2,22   | 1,56                                 | 3,12                            |
|                                           | 0,12                               | 1,5         | 1,99   | 1,4                                  | 1,8                             |
| 11                                        | 0,08                               | 1,33        | 2,29   | 2,29                                 | 4,56                            |
|                                           | 0,12                               | 1,78        | 2,17   | 1,53                                 | 3,06                            |
| 13                                        | 0,24                               | 3,45        | 2,13   | 1,5                                  | 3                               |
| 14,5                                      | 0,24                               | 3,33        | 2,1    | 1,48                                 | 2,97                            |
|                                           | 0,3                                | 4,49        | 2,18   | 1,54                                 | 3,08                            |

Выполнен анализ эффективности использования оросителей при учёте работы одного оросителя или четырёх оросителей вместе. Разработаны схемы оптимального расположения оросителей. Определён общий расход воды в системе с учётом оптимального расстояния между оросителями.

Вычислен коэффициент перевода единиц измерения нормативной интенсивности к системе СИ.

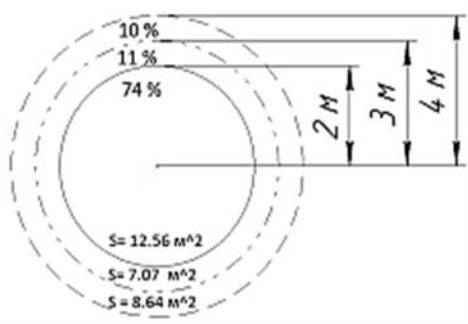


Рисунок 3 – Зависимость орошаемой площади от расхода воды, для оросителя СВН-10

Сформированы таблицы с данными об интенсивностях оросителей, которые были рассчитаны с помощью процентного содержания расхода воды на защищаемой площади с соответствующим радиусом (рисунок 3). На основе таблиц с данными об интенсивностях разработаны таблицы для оптимального распо-

ложения оросителей, которые можно использовать, если интенсивность орошения будет обеспечиваться при одновременной работе четырёх оросителей.

### Литература

1. Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.02-317-2018 (33020). – Введ. 01.09.2018.
2. Стационарные системы пожаротушения: автоматические спринклерные установки пожаротушения. Проектирование, монтаж и техническое обслуживание: ТКП EN 12845:2015. – Введ. 01.06.2018. – Минск. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018.
3. Стационарные системы пожаротушения: автоматические спринклерные установки пожаротушения. Проектирование, монтаж и техническое обслуживание: EN 12845:2015. – Британия, 2015.

УДК 620.178

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВАНИИ ЗАКОНА МЕЙЕРА Крень А.П.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Существующие методики определения показателя деформационного упрочнения  $n$  для металлов предполагают проведение большого числа разрушающих испытаний образцов на разрывных машинах. Такой подход не всегда применим на практике, особенно при проведении технического диагностирования потенциально опасного оборудования, отработавшего назначенный ресурс. В этой связи, в работе была поставлена задача разработать методику неразрушающего контроля  $n$  с использованием данных динамического микроударного деформирования материалов – индентирования.

Развитые теоретические основы позволили предложить следующие способы определения  $n$  на основании закона Мейера [1]:

1) с применением экспериментальной зависимости диаметра контактного отпечатка от нагружающего усилия  $P$ ;

2) дифференциальный способ определения  $n$  в каждой точке кривой нагружения.

Закон Мейера получен для случая вдавливания сферического индентора диаметром  $D$  в испытуемый материал и записывается в виде:

$$P = ad_c^m, \quad (1)$$

где  $a$  – постоянный коэффициент, зависящий от  $D$  и механических характеристик контролируемого материала,  $d_c$  – диаметр проекции пластического (контактного отпечатка), определяемый оптическим путем или расчетом,  $m$  – индекс Мейера,

который связан с показателем деформационного упрочнения  $n$  зависимостью:

$$m = n + 2 \quad (2)$$

Для определения  $n$ , прологарифмируем уравнение (1) и с учетом (2) получим:

$$\lg(P) = \lg(a) + (n + 2) \cdot \lg(d_c) \quad (3)$$

Расчет  $n$  в данном случае можно выполнить после проведения нескольких внедрений индентора с различной величиной нагрузки  $P$  и измерения соответствующих значений  $d_c$  или исходя из непрерывно снимаемой диаграммы вдавливания  $P = f(h)$ . В обоих случаях для этого используется значение угла наклона зависимости (3).

$$n = \frac{\Delta \lg(P_{max})}{\Delta \lg(d_c)} - 2 \quad (4)$$

Описанный способ определения  $n$  может реализовываться, как при статическом вдавливании, так и при ударном нагружении. В тоже время, для различных металлов значение  $n$  может, как оставаться постоянным (например, для алюминия и свинца), так и значительно уменьшаться (для сталей) при увеличении скорости деформации, что характерно для ударного индентирования. Здесь также следует отметить, что закон Мейера выполняется при статических измерениях при отношении  $d_c/D \geq 0,1$ , то есть в области деформаций свыше 2%. При меньшем соотношении  $d_c/D$  (при малых деформациях) значение  $n$  достаточно резко увеличивается.

Дифференциальный способ определения показателя деформационного упрочнения в заданной точке диаграммы вдавливания очень важен при создании новых видов материалов и оценке технического состояния металла при его длительной эксплуатации. Деформационное упрочнение является сложным, структурно чувствительным процессом, зависящим от характера образования, количества и вида дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов), образующихся при пластической деформации. По характеру изменения  $n$  можно судить о плотности дефектов кристаллического строения, размере и ориентации зерен металла, развитии стадии упрочнения. Для того чтобы определить показатель упрочнения в заданной точке диаграммы вдавливания найдем производную выражения (1) и воспользуемся существующей связью  $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$ , а также формулой (2). В результате преобразований получим:

$$n = 2 \left( \frac{dP/dh_c}{P/h_c} - 1 \right) \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет определить  $n$  по результатам одного измерения по величине отношения тангенсов угла наклона касательной в заданной точке диаграммы и прямой, проходящей через начало координат и ту же точку диаграммы. Если углы наклонов касательной и прямой совпадают, то  $n = 0$ , что соответствует идеально пластичному, неупрочняемому материалу. В случае если наклон касательной больше, чем тангенс угла прямой ( $n > 0$ ), то мы имеем дело с упрочнением материала, если меньше ( $n < 0$ ) – с разупрочнением. Определяя  $n$  в каждой точке кривой вдавливания, можно проследить стадии упрочнения испытуемого металла при вдавливании сферического индентора.

Экспериментальная проверка теоретических положений проводилась на цветных металлах и сталях с помощью прибора ИСУМ-1, разработанного в ИПФ НАН Беларуси (рисунок 1). Прибор позволяет осуществить измерения с предупредительной скоростью в диапазоне 0,3–3,5 м/с.



Рисунок 1 – Прибор ИСУМ-1 для динамического индентирования материалов

Результаты испытаний металлов представлены в таблице. Для сравнения в ней также приводятся сведения о показателе  $n$ , полученном при статическом индентировании на твердомере Бринелля.

Таблица – Результаты испытаний

| Материал, твердость по Бринеллю | Динамическое нагружение |           | Статическое нагружение |           |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|                                 | $n$                     | $d_c / D$ | $n$                    | $d_c / D$ |
| Сталь 109НВ                     | 0,054                   | 0,16      | 0,24                   | 0,31      |
|                                 |                         | 0,14      |                        | 0,27      |
|                                 | 0,15                    | 0,10      |                        | 0,23      |
|                                 |                         | 0,08      |                        | 0,2       |
| Сталь 27,5HRC                   | 0,051                   | 0,13      | 0,26                   | 0,28      |
|                                 |                         | 0,12      |                        | 0,25      |
|                                 | 0,13                    | 0,09      |                        | 0,22      |
|                                 |                         | 0,07      |                        | 0,18      |
| Сталь 45,7HRC                   | 0,16                    | 0,12      | 0,27                   | 0,21      |
|                                 |                         | 0,10      |                        | 0,2       |
|                                 | 0,22                    | 0,08      |                        | 0,17      |
|                                 |                         | 0,07      |                        | 0,14      |
| Сталь 62,3HRC                   | 0,26                    | 0,10      | 0,32                   | 0,23      |
|                                 |                         | 0,09      |                        | 0,21      |
|                                 | 0,48                    | 0,08      |                        | 0,13      |
|                                 |                         | 0,06      |                        | 0,12      |
| Медь 58НВ                       | 0,27                    | 0,19      | -                      | -         |
|                                 |                         | 0,17      |                        |           |
|                                 |                         | 0,14      |                        |           |
|                                 |                         | 0,11      |                        |           |
| Алюминий 142НВ                  | 0,25                    | 0,16      | 0,27                   | 0,26      |
|                                 |                         | 0,14      |                        | 0,22      |
|                                 |                         | 0,11      |                        | 0,18      |

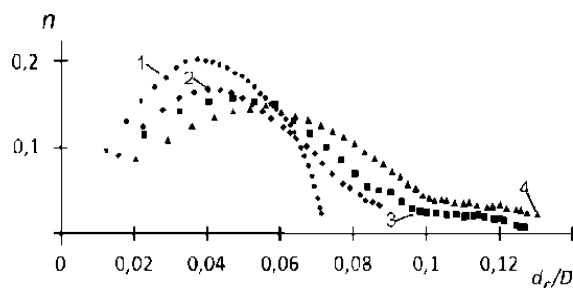


Рисунок 2 – Изменение  $n$  для стали с твердостью 27,5 HRC в зависимости от соотношения  $d_c / D$  и предупредительной скорости: 1 – 0,87; 2 – 0,72; 3 – 0,44 и 4 – 0,26 м/с

В ходе экспериментов было установлено, что на значение  $n$  оказывает влияние как скорость деформации  $\dot{\epsilon}$ , так и сама величина деформации ( $\epsilon \sim d_c / D$ ). При отношении  $d_c / D < 0,1$  в большинстве случаев наблюдается резкий рост  $n$ . Значения  $n$ , полученные при динамическом индентировании, меньше величины  $n$  для статического внедрения индентора, что объясняется влиянием скорости деформации, которая в случае ударного внедрения составляет около  $10^3 \text{ с}^{-1}$ , а при статическом не превышает  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Для сталей с высокой твердостью 45–62 HRC значения  $n$  более близки. Данный факт можно объяснить тем, что для этих материалов наблюдается преимущественно упругий характер деформирования, а пластическая деформация не достигает нужных значений для выполнения закона Мейера.



Если рассматривать изменение значения  $n$  в каждой точке процесса деформирования (формула (5)), то оно сходно (рисунок 2) по своему характеру, представленному в работе [2].

Как можно видеть на рисунке, где в качестве примера приведена такая зависимость для стали с твердостью 27,5 HRC, вначале наблюдается рост коэффициента деформационного упрочнения, а затем существенное падение. При этом для алюминия  $n$  во всех случаях практически не меняется (таблица), что также не противоречит известным данным [3] и обусловлено строением кристаллической решетки – ГЦК.

УДК 620.179.17

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ, МОЩНОСТИ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Кулагин В.Н., Линевич С.Я., Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь*

Практически любые механизмы, энергетические установки и детали электрических, тепловых, ядерных машин в электротехнике, транспортном машиностроении, в частности, электромобилестроении, быту, содержат электрические машины, например, электродвигатели постоянного или переменного тока. То есть электродвигатели относятся к объектам, определяющим эффективность производства и технический прогресс. Учитывая, что для работы электрических машин приходится до 45 % всей потребляемой электроэнергии [1], экономия энергоресурсов при их конструировании и усовершенствовании становится острее и актуальнее.

В большинстве случаев во вращающихся валах двигателей необходимо регулировать либо скорость вращения, либо крутящий момент, мощность, или КПД. Однако, как правило, регулирование скорости вращения вала или других характеристик электродвигателя приводит к росту энергозатрат, повышенному расходу материалов, внесению в схему управления дополнительных силовых или электронных элементов, что приводит к повышенному расходу энергетических и материальных затрат. Так, в [2–4] приведены различные способы, методики и схемы устройств для регулирования частоты вращения вала электродвигателя на основе усложнения конструкций электродвигателя. Поэтому главной задачей при создании новых высокоэффективных электрических машин является повышение энергоэффективности за счет снижения общих потерь (электроэнергии, материалоемкости, себестоимости и массогабаритов).

Целью настоящей работы является разработка методики и конструкции устройства, изготовление и испытание макета устройства для регулирования частоты вращения вала, мощности или

## Литература

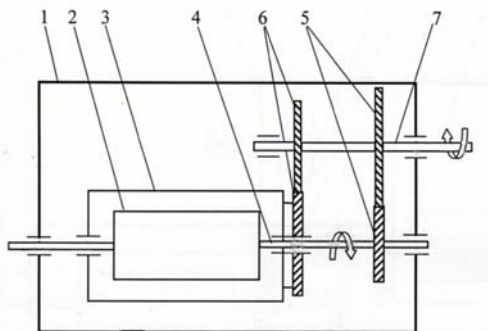
1. Tabor, D. The Hardness of Metals. Oxford University Press, 2000. 175 p.
2. Krokha, V.A. Relationship of the strain-hardening exponent to the degree of strain and fulfillment of the exponential rule of hardening // Strength of materials Volume 13, Is. 8, 1981, p. 1022–1027.
3. Mok, C.H. The dynamic stress-strain relation of metals as determined from impact tests with a hard ball // Int. J. Mech. Sci. Pergamon Press Ltd. 1965. Vol. 7, pp. 355–371.

крутящего момента электродвигателя без дополнительных энергозатрат.

Возможность регулирования скорости вращения вала электродвигателя основана на том, что предлагаемое устройство содержит корпус; внутри вращающегося статора, выполненного относительно корпуса двигателя подвижным, расположен вращающийся в том же направлении ротор, соединенный с первым зубчатым передаточным механизмом с регулируемым передаточным отношением, который последовательно соединен со вторым зубчатым передаточным механизмом с регулируемым передаточным отношением механически связанным с первым зубчатым передаточным механизмом, образуя между ротором и статором положительную обратную связь (ПОС). Эффект повышения мощности и крутящего момента с ПОС достигается благодаря наличию прямой механической связи между ротором и статором, обеспечивающей сложение собственных скоростей вращения ротора и статора и осуществляемой с помощью двух передаточных зубчатых механизмов. Такое соединение позволяет управлять скоростью, мощностью и крутящим моментом электродвигателя без дополнительных материальных и энергетических затрат.

На рисунке 1 представлена структурная схема устройства. Регулирование частоты вращения вала, мощности или крутящего момента основано на том, что при включении устройства, размещенного в корпусе 1, вращение ротора 2, находящегося внутри статора 3, посредством ведущего вала 4 с помощью первого зубчатого передаточного механизма 5, представляющего собой зубчатую передачу с непосредственным касанием закрепленных на валах зубчатых колес, состоящую из колесной пары и конструктивно выполненную как единое целое и соединенную с валом 4 ротора 2 приводит во вращение ведомый

вал 7, одновременно соединенный со вторым зубчатым передаточным механизмом 6, представляющим собой колесную пару, одно из зубчатых колес колесной пары первого зубчатого передаточного механизма 5 установлено и закреплено на ведомом выходном валу 7, второе – закреплено со статором 3 [5].



1 – корпус, 2 – ротор, 3 – статор, 4 – ведущий вал двигателя, 5 – первый зубчатый передаточный механизм, 6 – второй зубчатый передаточный механизм, 7 – ведомый выходной вал электродвигателя

Рисунок 1 – Структурная схема эффективного устройства для повышения скорости, мощности и крутящего момента электродвигателя

Положительная обратная связь, образуемая ротором 2 и статором 3, которая, по сути, ускоряет реакцию механической системы – цепей «ротор – первый зубчатый передаточный механизм – второй зубчатый передаточный механизм – статор – ротор – выходной вал», совпадает по фазе и усиливает эффект взаимодействия ротора 2 со статором 3, имеющего скорость вращения, допустим  $N_1$ , в результате чего ротор 2, вращающийся со скоростью  $N_2$ , за счет полученного импульса от вращающегося момента, возникающего от вращения статора 3, вращается быстрее.

Передаточные отношения в обоих зубчатых передаточных механизмах могут быть различными и выбираться в зависимости от конкретной задачи, например, 1:1, 1:2 и т. д., т. е., регулируемы. За счет сложения равнонаправленных скоростей ( $N_1 + N_2$ ) одновременно вращающихся ротора 2 и статора 3, ведомый выходной вал 7, начинает вращаться быстрее, но уже со скоростью  $N_0 = N_1 + N_2$ .

Повторение и непрерывность во времени данного процесса вследствие наличия ПОС между вращающимися ротором 2 и статором 3, в конечном итоге, автоматически, без подпитки внешней энергией, питания или внешней силы, обуславливает непрерывное увеличение угловой скорости вращения вала электродвигателя до его стабильных значений. Попросту говоря, ротор вращает статор, в результате скорость вращения на выходном валу двигателя складывается из собственных скоростей ротора и статора.

В результате устройство, имея на валу 4 ротора 2 свою скорость вращения и обладая собственной скоростью вращения статора 3, на ведомом выходном валу 7 в результате сложения двух угловых скоростей вращения позволяет получить результирующую скорость вращения двигателя, превышающую скорости от ротора и статора в отдельности, с возможностью ее регулирования.

В процессе испытаний созданного макета устройства использовались различные типы электродвигателей постоянного и переменного тока. Практически во всех случаях предлагаемые методика и схема устройства позволили получить значительный выигрыш по частоте вращения вала электродвигателя, значению крутящего момента, мощности и КПД электрической машины.

В результате предварительных испытаний с использованием, в частности, электродвигателя переменного тока с протяженным валом, выходящим с обоих концов двигателя, получено, что результирующая скорость вращения выходного вала, равная  $N_0$ , изменяется в зависимости от передаточного отношения зубчатых механизмов. При этом на результирующую скорость могут влиять различные факторы (нестабильность работы двигателя, изношенность деталей, скачки напряжения в сети, дефекты колесной пары, потери на трение и др.).

На рисунке 2 представлена фотография внешнего вида фрагмента макета действующего устройства, используемого в процессе предварительных испытаний.

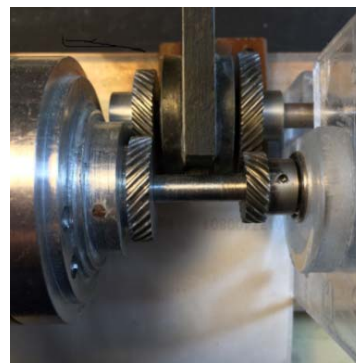


Рисунок 2 – Фотография внешнего вида фрагмента макета устройства для повышения частоты вращения, мощности, крутящего момента вала электродвигателя

Таким образом, используя принцип двойного вращения и, изменяя значения передаточных отношений в зубчатых передаточных механизмах 5 и 6, устройство позволяет управлять как скоростью вращения выходного вала 7 электродвигателя, так и мощностью, или крутящим моментом, являющимися основными характеристиками электродвигателя или электрической машины. Данную конструкцию устройства можно отнести к инновационному решению, которое может быть использовано при разработке и конструировании электрических машин.

### Литература

1. Paul Waide, Conrad U. Brunner. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric-Motor-Driven Systems. International Energy Agency Working Paper, Energy Efficiency Series. Paris, 2011.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб. : Питер, 2010. – 350 с.
3. Патент РФ 2076450. МПК: В60 К 17/02; F16H 48/00; H02 K16/02; H02K 7/116. 27.03.1997. Способ регулирования частоты вращения двига-

теля двойного питания и устройство для его осуществления / Мещеряков В.Н.

4. Патент РФ № 2130226. МПК: H02K17/00, H02P 7/00. 10.05.1999. Асинхронный электродвигатель с бесступенчатым регулированием вращения / Касимов Л.Н., Шаньгин Е.С., Насыров В.С.

5. Патент на ПМ РБ № 11770 от 19.02.2018 / Линевиц С.Я., Бусько В.Н. // Устройство для повышения мощности и крутящего момента электродвигателя.

УДК 620.179

## ОЦЕНКА РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ

Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Контроль внутренних напряжений играет важную роль при диагностике технического состояния различных элементов несущих конструкций. Не менее важно оценивать наличие и величину напряжений и для функциональных теплозащитных покрытий, одними из которых являются покрытия из никеля. Данные покрытия наносятся на изделия космической и авиационной техники, машиностроительную продукцию.

При несоблюдении технологического процесса нанесения в покрытиях могут возникать внутренние напряжения, превышающие по величине силы адгезии, что приводит к их отслаиванию. Такая ситуация является недопустимой для деталей и сборочных единиц авиакосмической техники, в связи с чем создание новых надежных методов контроля приобретает первостепенную роль в обеспечении качества и надежности таких изделий.

Одним из методов, позволяющих оценивать качество ферромагнитных покрытий, является магнитный пондеромоторный метод [1]. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке других методов и приборов контроля внутренних напряжений: коэрцитиметров, ультразвуковых дефектоскопов, рентгеновских дифрактометров, пондеромоторный метод не утратил своей значимости благодаря возможности создания на его базе портативных приборов, обладающих высокой точностью измерений. В полученных ранее результатах [2] было показано, что влияние внутренних напряжений на магнитоотрывное усилие  $K_f$  тем больше, чем слабее поле магнита, в котором находится никелевый образец. Это говорит о низкой магнитной проницаемости образцов, имеющих внутренние напряжения и большей концентрации поля в отожженных образцах (со снятыми напряжениями).

Данные результаты легли в основу настоящей работы, целью которой являлось исследование возможности контроля внутренних напряжений

в никелевых образцах, подверженных растягивающим одноосным напряжениям.

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы согласно ГОСТ 11701 для их последующих испытаний в разрывной машине (рисунок 1). Вначале для образцов, имеющих различный исходный уровень напряжений, создаваемый термообработкой и прокаткой, определялись величины предела текучести и предела прочности. Далее проводились испытания, представляющие собой циклы растяжения образцов с последующей полной разгрузкой. очередность циклов была установлена таким образом, чтобы максимальная нагрузка (вершина цикла) нарастала с каждым циклом. Схема испытаний представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Испытание образцов

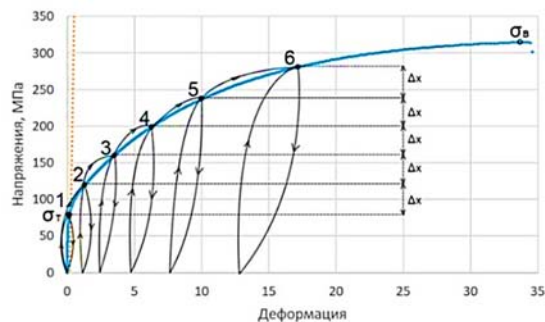


Рисунок 2 – Пример схемы нагружения образца

Измерение магнитоотрывного усилия проводилось в вершинах циклов и на разгрузке. Вершины

циклов были разнесены друг от друга на величину  $\Delta x$ , которая определялась отдельно для образцов с разным начальным уровнем напряжений.

Испытания, проведенные в цикле с нагрузкой, не превышающей значение предела текучести, показали, что величина магнито-отрывного усилия при полном снятии нагрузки принимала исходное значение, что говорит о достоверности проведенных измерений и наличии простой устойчивой связи между величиной  $K_f$  и значением растягивающих внутренних напряжений в области упругих деформаций.

В качестве примера на рисунке 4 и 5 показаны зависимости  $K_f$  при нагружении упрочненного и отожженного образцов. Для упрочненного образца, в котором внутренние напряжения уже имеют некоторую величину, исходное значение  $K_f$  ниже, чем для отожженного (рисунок 4). При этом упрочненный образец деформируется упруго и при разгрузке значения  $K_f$  возвращаются к исходным. При растяжении отожженного образца с момента превышения напряжениями значения предела текучести значения  $K_f$  после полной разгрузки имеют новую величину, что говорит о создании в образце дополнительных внутренних напряжений, вызванных пластической деформацией.

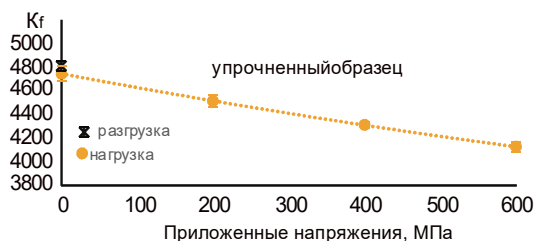


Рисунок 4 – Изменение магнитоотрывного усилия для образца с исходным высоким уровнем внутренних напряжений

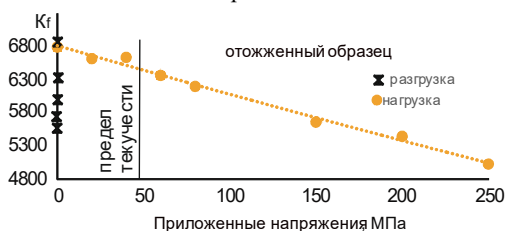


Рисунок 5 – Изменение магнитоотрывного усилия для отожженного образца (со снятыми внутренними напряжениями)

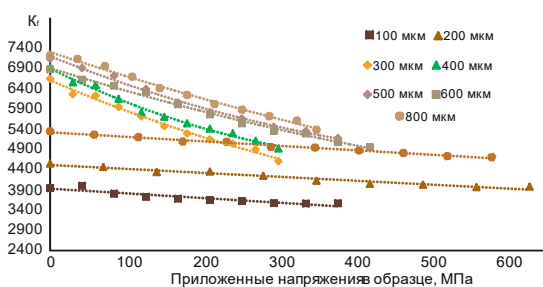


Рисунок 6 – Изменение  $K_f$  при нагружении образцов различной толщины

Испытания, проведенные на большом количестве образцов с разной толщиной (до 800 мкм) подтвердили указанную зависимость (рисунок 6). Начальное значение результатов измерений зависит от исходного уровня напряжений в образцах и толщины образцов, а их наклон является близким и меняется незначительно от наличия примесей и значительно от степени упрочнения.

Полученные данные позволяют говорить о том, что для получения градуировочных зависимостей, связывающих  $K_f$  и действующие напряжения, необходимо знать две дополнительных параметра: толщину образца и исходный уровень внутренних напряжений. Оценить влияние этих двух факторов на характер зависимости можно, если провести дополнительные испытания, для чего необходимо изготовить образцы и отжечь их с целью полного снятия напряжений.

Далее, проводя растяжение образцов до заданного уровня приложенных напряжений  $\sigma_m$ , тем самым создавая одинаковый уровень внутренних напряжений в материале. Определяя величину  $K_f$  для действующих напряжений в диапазоне  $0-\sigma_m$  для различных  $\sigma_m$  можно получить кривые с разным наклоном и начальным значением результатов измерений для образца известной толщины с заданным уровнем внутренних напряжений.

Для построения градуировочных зависимостей отдельно для приложенных и внутренних напряжений необходимо проведение дополнительных исследований, которые позволят связать значение магнитоотрывного усилия  $K_f$ , магнитной проницаемости  $k$ , толщины образцов  $h$  и величины приложенных  $\sigma$  и внутренних напряжений  $\sigma_i$  в образцах. В качестве основы для этого может служить известное уравнение для  $k$  [3]:

$$k = \frac{2\mu_0 J_s^2}{9\lambda_s \sigma_i} \left[ 1 - \frac{\sigma}{5\sigma_i} \right]$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $J_s$  – намагниченность,  $\lambda_s$  – коэффициент магнитострикции.

Таким образом, в работе показано, что внутренние напряжения оказывают существенное влияние на значение магнитоотрывного усилия  $K_f$ . Установлен характер изменения  $K_f$  при приложении к никелевым образцам растягивающих напряжений, характерных для гальванических никелевых покрытий. Определены направления дальнейшего развития метода: разделение влияния приложенных и внутренних напряжений на величину  $K_f$ .

### Литература

1. Калошин В.А., Рудницкий В.А., Гнутенко Е.В., Крень А.П. Исследование и адаптация электромагнитного метода к определению толщины металлокерамических покрытий // Труды ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» том 32, 2016. – С. 167–177.
2. Рудницкий В.А., Гнутенко Е.В., Крень А.П. Определение толщины двухслойных ни-

кель-хромовых покрытий магнитным методом // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 34–39.

3. С.В. Вонсовский и Я.С. Шур. Ферромагнетизм, Гос. изд-во тех.-теор. лит-ры, М. – Л., 1948. – 816 с.

УДК 620.178

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Крень А.П., Ланцман Г.А., Рудницкий В.А.

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Предел текучести  $\sigma_T$  является одной из механических величин, измерение которой обязательно при проведении технического диагностирования потенциально опасного промышленного оборудования: трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, изделий машиностроения и др. В большинстве случаев для определения величины  $\sigma_T$  используются специальные образцы, заготовки для изготовления которых вырезаются из основного металла (или сварного соединения). В дальнейшем данные образцы разрушаются на испытательных машинах для получения диаграммы растяжения и расчета значения  $\sigma_T$ . При этом в зависимости от характера деформирования определяют физический или условный предел текучести, но не разделяют эти понятия при проведении прочностных расчетов, называя оба из них просто пределом текучести. Неизбежное повреждение металла изделия требует впоследствии расходов на проведение ремонта, а изготовление образцов также является довольно затратным по времени процессом. В этой связи, проведение исследований по созданию неразрушающего метода контроля предела текучести является актуальным направлением для промышленности.

В данной работе рассматривается возможность неразрушающего контроля предела текучести сталей, основанная на обработке данных диаграммы динамического вдавливания сферического индентора в испытуемый материал. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование части диаграммы ударного вдавливания, охватывающей две стадии: чисто упругое и упругопластическое деформирование.

В настоящей работе предлагается подход, заключающийся в определении  $\sigma_T$  для некоторой заданной остаточной деформации, при которой в материале создаются пластические деформации, близкие к  $\varepsilon = 0,002$  (0,2 %), соответствующей условному пределу текучести при растяжении для материалов без выраженной площадки текучести. В этом случае результат определения  $\sigma_T$  практически не будет зависеть от коэффициента деформационного упрочнения  $n$ .

Рассмотрено использование этого подхода при условии использования динамических диа-

грамм внедрения индентора в металл. Как правило, в записываемых диаграммах вдавливания, в координатах «контактное усилие  $F$  – глубина внедрения  $h$ » (рисунок 1), стадия чистой упругой деформации занимает очень малую часть в общей деформации, и выделить ее из получаемых зависимостей очень сложно.

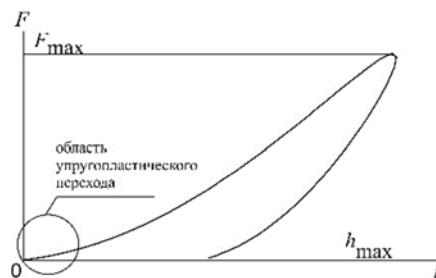


Рисунок 1 – Типичная диаграмма вдавливания

Возможность точной регистрации упругопластического перехода повышается, если следовать результатам работ [1, 2], где было установлено, что, хотя начало пластического течения имеет место при  $P_m/\sigma_T = 1,07$  ( $P_m$  – среднее контактное давление), практическое проявление пластической деформации происходит при  $P_m/\sigma_T = 1,6$ . Если воспользоваться зависимостью  $\frac{P_m}{\sigma_T} = f\left(\frac{E^* d_c}{\sigma_T D}\right)$ , приведенной в [3], и формулой (1), то для значений  $E^*/\sigma_T = 250 \div 500$ , эта величина будет соответствовать приближительному значению деформации  $0,2 \div 0,6$  %. При этом, как показано в [2] использование значения 1,6 вместо 1,07 дает погрешность в оценке предела текучести материалов от -3,1 до +3,3 % от справочного значения  $\sigma_T$ .

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d_c}{D} \quad (1)$$

Данные результаты говорят о том, что диапазон, в котором реально может фиксироваться переход от упругой к упругопластической деформации при индентировании может быть расширен, поскольку начальная стадия микропластичности практически не будет оказывать влияния на процесс движения индентора, а значит и на диаграмму вдавливания. Поэтому для расчета  $\sigma_T$  оценивалось среднее контактное давление для точки диаграммы, где  $d_c/D = 0,03$  ( $\varepsilon = 0,6$  %):

$$P_m = 4F / (\pi d_c^2), \quad (2)$$

которое считалось равным динамическому пределу текучести, имеющему связь со статическим  $\sigma_T$ , определяемому при разрушающих испытаниях.

Экспериментальные исследования для определения динамического предела текучести осуществлялись с помощью прибора, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Для того, чтобы фиксировать переходную область от упругого до упругопластического вдавливания, диаметр сферы индентора  $D$  был выбран равным 12 мм, а кинетическая энергия удара варьировалась в пределах  $0,18 \div 1,9$  мДж. В результате испытаний были получены диаграммы вдавливания в координатах  $F = f(h)$ , которые затем преобразовывались в кривые зависимости среднего давления  $P_m = f(d_c/D)$  (рисунок 2).

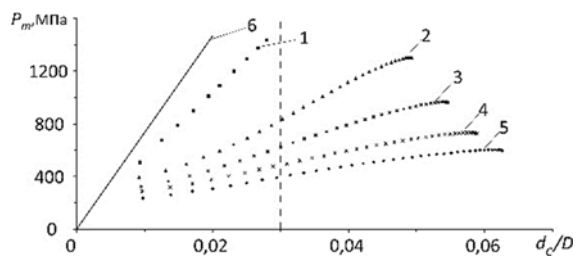


Рисунок 2 – Зависимости среднего давления  $P_m$  от соотношения  $d_c/D$  для упругопластического вдавливания (кривые 1–5), и теоретическая зависимость (кривая 6) согласно уравнению Герца

Для определения  $\sigma_T$  принималось соотношение  $d_c/D = 0,03$  ( $\varepsilon = 0,6\%$ ), отмеченное вертикальной линией (рисунок 2), по которому определялось соответствующее ему среднее контактное давление  $P_{m(0,6)}$ , пропорциональное  $\sigma_T$ . Выбранная величина деформации, как показано при теоретическом рассмотрении, соответствует диапазону, в котором начинают значимо проявляться пластические деформации при индентировании, поэтому определенное по рисунку 2 значение  $P_{m(0,6)}$  считалось равным динамическому пределу текучести  $\sigma_T^d$ .

На рисунке 3 приведена зависимость, связывающая динамический  $\sigma_T^d$  и статический  $\sigma_T$  пределы текучести. Истинное значение  $\sigma_T$  получали путем разрушающих испытаний стандартных образцов на разрыв.

На графике также нанесены доверительные интервалы при доверительной вероятности 0,90. Как видно из графиков, доверительный интервал при определении величины  $\sigma_T$  исходя из значений  $P_{m(0,6)}$  составляет 40 МПа (погрешность измерения не превысила 60 МПа или 13% во всем диапазоне). Зависимость, представленная на рисунке 3 описывается уравнением  $\sigma_T = 1,82 \cdot \sigma_T^d - 529$ .

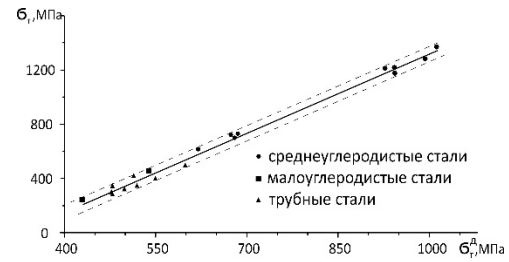


Рисунок 3 – Связь динамического предела текучести  $\sigma_T^d$  со статическим пределом текучести  $\sigma_T$ . Штриховые линии – границы доверительного интервала

Также можно отметить, что для мягких сталей динамический предел текучести  $\sigma_T^d$  гораздо выше по сравнению со статическим  $\sigma_T$ , при чем разность между ними уменьшается с ростом статического предела текучести и при высоких значениях  $\sigma_T$  пределы текучести близки по величине. При этом для твердых образцов  $\sigma_T^d$  даже несколько ниже  $\sigma_T$ , что означает, что при этой энергии удара материал не достиг значимых пластических деформаций при индентировании. Эти результаты полностью согласуются с литературными данными [4].

Предложенные алгоритмы позволяют получить достаточно достоверные значения предела текучести, что подтверждается проведенными экспериментами на широком круге материалов: низко-, среднеуглеродистых и трубных сталях.

К достоинствам разработанных теоретических положений следует отнести использование динамического индентирования, не требующего создания замкнутой силовой системы для нагружения материала, что позволяет проводить контроль непосредственно стальных изделий без их разрушения.

Разработанные теоретические положения, базирующиеся на основах механики контактно-взаимодействия упругопластичных материалов с жестким индентором, доказавших свою эффективность при описании деформирования сталей различного класса.

### Литература

1. Mesarovic S.D., Fleck N.A. Spherical indentation of elastic-plastic solids // Proc. Royal Soc. Lond. 1999. V. 45. P. 2707–2728.
2. Herbert E.G. On the measurement of stress-strain curves by spherical indentation // Thin solid films. 2001. P. 331–335.
3. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985. 452 p.
4. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2013. – 224 с.

УДК 621.391.8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА В ПРИСУТСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Левко И.А.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Оценка параметров одночастотных синусоидальных сигналов широко применяется на практике для тестирования как отдельных аналого-цифровых преобразователей, так и для проверки работоспособности систем автоматизации в целом либо для решения ряда измерительных задач в различных технических областях. Методы оценки можно разделить на два класса:

- Аппроксимационные, использующие подбор функции вида  $A \sin(\omega t + \varphi) + d$  к исследуемому сигналу [1];

- Спектральные, в которых применяется анализ сигнала в частотной области [2].

Спектральные методы оценки параметров синусоидального сигнала подвержены влиянию эффекта «просачивания» спектра, который приводит к появлению амплитудных ошибок [2, с. 173] и снижает точность оценки частоты и фазы сигнала. Этот эффект проявляется при нецелом числе периодов входного сигнала, записанном в обрабатываемой последовательности отсчетов. Хотя данный эффект может быть устранен при когерентной записи отсчетов входного сигнала, когда частота источника сигнала полностью синхронизирована с приемником сигнала, но на практике это можно осуществить только для узкого набора частот. При использовании произвольного набора частот для уменьшения эффекта «просачивания» спектра возникает необходимость в использовании оконных функций [2, с. 174–180].

Основным преимуществом аппроксимационных методов оценки параметров является то, что при их использовании эффект «просачивания» спектра не наблюдается. Различают трех- и четырехпараметрические аппроксимационные методы, в которых частота сигнала может быть соответственно заранее известна или нет.

В общем виде подбираемая математическая синусоидальная функция  $s_\xi$  имеет вид:

$$s_\xi(t) = A_\xi \sin(\omega_\xi t + \varphi_\xi) + d_\xi, \quad (1)$$

где  $A_\xi$  – амплитуда;  $\omega_\xi$  – круговая частота;  $\varphi_\xi$  – начальная фаза;  $d_\xi$  – постоянное смещение. Аргумент  $t$  представляет непрерывное время. Отсчеты входного сигнала  $s(kT_S)$  описываются дискретным временем, имеющим постоянный интервал, равный периоду дискретизации  $T_S$ . Число анализируемых отсчетов конечно, то есть  $k = 0..M$ . С учетом этого выражение (1) для дискретного времени переписывается как:

$$s_\xi(k) = A_\xi \sin(\omega'_\xi k + \varphi_\xi) + d_\xi, \quad (2)$$

где  $\omega'_\xi = 2\pi f_\xi / f_s$ ;  $f_\xi$  – частота входного сигнала;  $f_s = 1/T_S$  – частота дискретизации. Приведенные выше параметры подбираются так, чтобы функция (2) в наибольшей степени соответствовала входному синусоидальному сигналу.

В случае, когда частота входного сигнала  $f_\xi$  известна, с помощью тригонометрических соотношения, выражение (3) можно представить в виде:

$$s_\xi(k) = B \sin \omega'_\xi k + C \cos \omega'_\xi k + d_\xi, \quad (3)$$

где  $B$ ,  $C$  и  $d_\xi$  являются подгоночными параметрами (трехпараметрический метод), причем  $B = A_\xi \cos \varphi_\xi$ ,  $C = A_\xi \sin \varphi_\xi$ . Применяя методы линейного регрессионного анализа, можно однозначно аппроксимировать входной сигнал синусоидальной функцией [1].

При использовании цепей питания измерительной аппаратуры, входящих в состав систем автоматизации, от сети переменного тока возникает необходимость соблюдения стандартов системы безопасности труда. В первую очередь это касается защиты персонала от поражения электричеством. Достаточно сказать, что по нормативам техники безопасности помещения, в которых установлены металлические трубы и радиаторы отопительной системы, считаются помещениями повышенной опасности и требуют заземления всех типов электронного оборудования даже в условиях научной или учебной лаборатории. Это приводит к возникновению проблемы, связанной с появлением помех, имеющих в своем спектре основную гармонику промышленной частоты  $f_H = 50$  Гц и более высокие гармоники этой частоты. Присутствие данных помех объясняется рядом факторов, к которым можно отнести соединение нейтрали (нулевого провода) понижающего трансформатора электрической подстанции с землей, наличие паразитных емкостей и электромагнитных наводок, приводящих к появлению паразитных токов. Кроме того, спектр помех, связанных с заземлением, может быть более широким за счет формирования электростатического заряда во время грозы в районе заземления.

Поэтому определенный интерес представляет исследование устойчивости аппроксимационных методов оценки синусоидального к помехам сети переменного тока.

Несомненным достоинством трехпараметрических методов аппроксимации является возможность использования узкополосной фильтрации, позволяющей свести к минимуму влияние помех сети переменного тока.

Однако на практике ряд задач требует оценки параметров синусоидального сигнала с неизвест-

ной амплитудой, частотой, фазой и постоянным смещением, т. е. применения четырехпараметрических методов аппроксимации. Как видно из формулы (2), данные методы являются нелинейными и, следовательно, не позволяют получить однозначного решения.

В связи с этим необходимо определять подгоночные параметры на основании критериев, используемых для оценки случайных сигналов. Среди них традиционным применяется метод наименьших квадратов [3, с. 684], который предполагает минимизацию среднеквадратической ошибки вида:

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^M [F(x_k) - f(x_k)]^2, \quad (4)$$

где  $f(x_k)$  – функция, заданная на дискретном множестве точек  $x_0, x_1, \dots, x_M$ ;  $F(x_k)$  – функция, которую нужно построить так, чтобы обеспечить минимизацию (4).

В отличие от традиционного метода наименьших квадратов в четырехпараметрическом методе аппроксимации синусоидальной функции вместо построения функции  $F(x_k)$  для формулы (4) можно использовать детерминированную функцию (2) с четырьмя подгоночными параметрами:  $A_\xi$ ,  $\omega_\xi$ ,  $\varphi_\xi$  и  $d_\xi$ . Тогда с учетом (3) выражение (4) можно переписать в виде:

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^M [A_\xi \sin(2\pi f_\xi / f_S k + \varphi_\xi) + d_\xi - s_\xi(k)]^2 \quad (5)$$

Следует отметить, что поиск минимума выражения (5) носит итерационный характер, причем число итераций зависит от скорости сходимости полученных результатов.

Еще одной особенностью применения метода нелинейной аппроксимации является зависимость погрешности определения параметров от начальных условий, т. е. от выбора начальных значений амплитуды, частоты, фазы и постоянного смещения, которые можно обозначить соответственно  $A_{\xi 0}$ ,  $\omega_{\xi 0}$ ,  $\varphi_{\xi 0}$  и  $d_{\xi 0}$ .

Также к факторам, влияющим на погрешность и скорость сходимости метода нелинейной аппроксимации, можно отнести количество периодов исходного сигнала, используемых при подборе функции (2).

Как правило, исходный сигнал содержит несколько периодов синусоидальной функции. Поэтому для оценки начального значения амплитуды целесообразно использовать глобальные минимум и максимум сигнала для уменьшения влияния постоянного смещения, то есть

$$A_{\xi 0} = \frac{\max\{s_\xi(k)\} - \min\{s_\xi(k)\}}{2}. \quad (6)$$

Оценка начального значения частоты осуществляется при использовании вспомогательного параметра: число отсчетов на период

$$N_\xi = f_S / f_\xi, \quad (7)$$

причем  $N_\xi$  может быть целым числом только в случае, когда частота сигнала кратна частоте дискретизации. Поэтому число отсчетов на период содержит целое число отсчетов между двумя переходами через нулевую линию от отрицательных значений к положительным и интерполяционную часть, определяемую по двум отсчетам в области перехода.

Этот же подход позволяет оценить начальное значение фазы, если четырехпараметрическая аппроксимация производится только на части сигнала между переходами через нулевую линию. После подбора синусоидальной функции появляется возможность однозначно определить фазу всего исходного сигнала. Начальное значение постоянного смещения также вычисляется при тех же условиях, что и частота.

Зависимости, приведенные на рисунке 1, имеют характерные колебания погрешности оценки с одинаковой периодичностью, причем наибольший разброс наблюдается в окрестности промышленной частоты 50 Гц и ее гармоник.

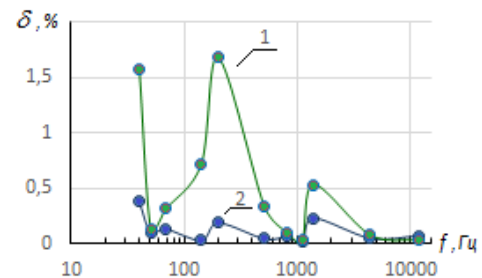


Рисунок 1 – Частотная зависимость погрешности оценки амплитуды (1) и частоты (2) по одному периоду при 2-х итерациях и отношении сигнал/шум 31 дБ.

Эту особенность следует учитывать при применении метода четырехпараметрической аппроксимации.

### Литература

1. Левко И.А. и др. Устройство для автоматизированного измерения динамической погрешности аналого-цифровых преобразователей // ПТЭ. – 1989. – № 3 – С. 86–89.
2. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / Пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 547 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1973. – 832 с.



## ВЛИЯНИЕ КОММУТАТОРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ТЕСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.

*Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Республика Беларусь*

В автоматизированных системах тестирования изделий микроэлектроники испытательные сигналы на объект подверженный тестированию (ОПТ) подают с помощью коммутатора, который оказывает существенное влияние на точность и чувствительность всей системы.

На измерение электрических величин влияют следующие параметры коммутатора:

- ток смещения, возникающий из-за гальванических наводок, из цепей управления;
- напряжение смещения, вызванное термоэлектрической разностью потенциалов на стыке разнородных металлов;
- сопротивление изоляции между цепями коммутатора;
- сопротивление канала коммутации.

Первые два параметра влияют на погрешность при измерении малых токов и малых напряжений, третий – при наличии в цепи больших сопротивлений, а четвертый – при измерении больших токов и малых сопротивлений.

Параметры коммутатора заметно ухудшаются в процессе эксплуатации. Это связано с износом и окислением контактов, старением и снижением изоляционных свойств материалов, с уменьшением поверхностного сопротивления корпусов реле, разъемов и печатных плат из-за постоянного загрязнения их поверхности веществами из окружающей среды.

Системы тестирования эксплуатируются в течение длительного времени, поэтому, из-за неизбежного ухудшения параметров коммутатора, необходима его периодическая проверка.

При тестировании изделий микроэлектроники широкое применение нашли матричные коммутаторы, которые, позволяют подключить любой испытательный сигнал к любому электроду ОПТ согласно заданной программе тестирования.

По сравнению с другими коммутаторами подобного назначения, матричный коммутатор выделяется сложной конструкцией и высокой стоимостью. Матрица коммутации состоит из множества узлов, в каждом из которых имеется, как минимум, по два ключевых элемента для коммутации испытательного сигнала и сигнала охраны.

Периодическая проверка матричного коммутатора занимает много времени из-за большого количества операций выполняемых вручную. Например, при сравнительно небольшом размере матрицы коммутации  $5 \times 48$ , проверка четырех параметров для каждого узла, требует выполнения порядка тысячи скрупулезных измерений

( $5 \times 48 \times 4 = 960$ ), что ведет к нежелательному простоя всей системы.

Из опыта проектирования различных типов коммутаторов, известно, что чем больше реле содержится в коммутаторе, тем затратнее обходится улучшение его параметров [1]. Отсюда следует, что матричные коммутаторы целесообразно использовать в области средних значений испытательных токов и напряжений, где погрешность измерений может быть снижена без чрезмерных затрат.

Однако, необходимость постоянного совершенствования изделий микроэлектроники, требует высокой точности измерения их параметров в граничных областях токов, напряжений и сопротивлений, которые и определяют качество и конкурентоспособность современных изделий. Например, в области малых токов и больших сопротивлений, или в области малых напряжений и малых сопротивлений, то есть там, где улучшение параметров громоздкого матричного коммутатора является сложным и затратным.

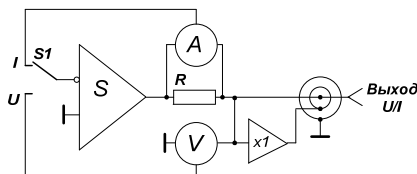
Нами разработан метод коммутации, который сочетает возможность автоматизации тестирования, с низким влиянием на параметры испытательного сигнала при коммутации малых токов и цепей с большим сопротивлением, или малых напряжений и цепей с малым сопротивлением, то есть обеспечивает высокую точность коммутации.

Предлагаемый метод основан на применении нескольких независимых каналов, каждый из которых предназначен для подключения испытательного сигнала лишь к одному электроду ОПТ, поэтому число каналов не может быть меньше чем количество электродов у объекта тестирования. Например, четыре канала коммутации достаточно для тестирования диодов, триодов и тетродов.

Канал коммутации состоит из двух каскадов. Первый каскад является источником испытательного сигнала и позволяет коммутировать вид испытательного сигнала – ток или напряжение. Второй каскад обеспечивает подключение испытательного сигнала выбранного вида к выходным портам коммутатора, которые соединены с электродами элементов, составляющих тестовый модуль.

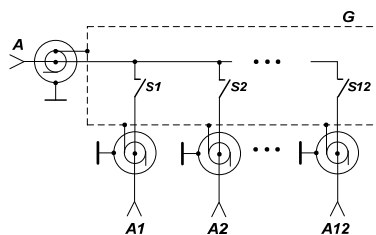
Первый каскад канала коммутации, для реализации предлагаемого способа, может быть выполнен на основе источника-измерителя (ИИ), который полностью соответствует предъявляемым требованиям. На рисунке 1 представлена структурная схема ИИ, на которой показан элемент коммутации вида формируемого сигнала S1.

Второй каскад коммутации, согласно предлагаемому способу, целесообразно выполнить в виде мультиплексного модуля (платы) коммутации, структурная схема которого представлена на рисунке 2.



A – измеритель тока, V – измеритель напряжения, S – источник сигнала на основе мощного операционного усилителя, S1 – переключатель обратной связи по току или по напряжению

Рисунок 1 – структурная схема первого каскада коммутации



A – условное наименование модуля коммутации, A1–A12 – выходные порты модуля A, S1–S12 – ключевые элементы (герконы), G – экранирующая охранный поверхность, эквипотенциальная сигналу (Guard)

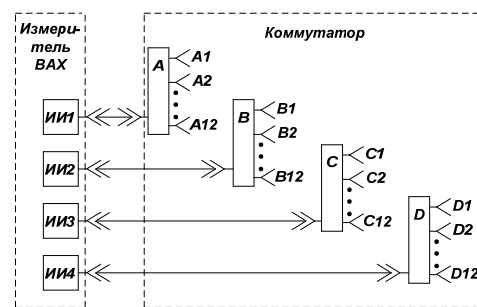
Рисунок 2 – структурная схема мультиплексного модуля коммутации

Коммутатор, реализующий новый метод, содержит известные средства формирования испытательного сигнала и известные средства коммутации, однако, как единое целое он не может быть отнесен ни к одному из описанных ранее типов коммутаторов [1]. Чтобы подчеркнуть разнородную структуру включенных последовательно каскадов коммутации, будем в дальнейшем называть его гибридным.

Как видно из рисунка 2, в измерительной цепи гибридного коммутатора будет замкнут лишь один ключевой элемент, то есть, последовательное включение двух каскадов не увеличивает его погрешность.

На рисунке 3 представлена структурная схема разработанного гибридного коммутатора, который содержит 4 модуля по двенадцать портов,

общее количество портов коммутатора составляет  $4 \times 12 = 48$ .



A, B, C, D – модули коммутации, A1–A12, B1–B12, C1–C12, D1–D12 – выходные порты мультиплексного коммутатора

Рисунок 3 – структурная схема разработанного гибридного коммутатора

Узлы гибридного коммутатора на его структурной схеме объединены не по каналам коммутации, а по функциональным признакам. В частности, четыре ИИ объединены в измеритель ВАХ, в качестве которого может быть использован измеритель ИППП-1, а четыре модуля – в мультиплексный коммутатор.

В ОАО «МНИПИ» изготовлен макет мультиплексного коммутатора, образующий вместе с ИППП-1 гибридный коммутатор, представленный на рисунке 3, и разработано соответствующее программное обеспечение.

Подготовка гибридного коммутатора к работе с тестовым модулем включает:

- установку программы тестирования,
- подключение присоединительного устройства, например зондовой установки, к портам коммутатора согласно установленной программе вручную.

Программа тестирования готовится заранее и должна учитывать, что электроды каждого ОПТ следует подсоединять к портам разных модулей (A, B, C, D).

Составление программы тестирования не требует специальных знаний в области программирования.

### Литература

1. Switching Handbook. A Guide to Signal Switching in Automated Test Systems / 6th Edition, Keithley Instruments, Inc., 2008. – USA. – 131 p.

УДК 531.385

## ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ГРАВИМЕТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И САМОНАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация

В настоящее время продолжают активные исследования в области гравиметрии. Если в глобальном плане гравитационное поле Земли известно по результатам спутниковых съемок,

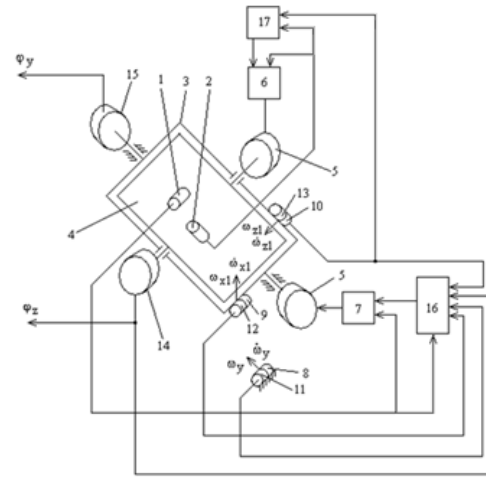
то крупномасштабные карты отдельных участков практически отсутствуют, хотя в них имеется большая потребность [1–5]. Задача повышения точности гравиметрических измерений является

актуальной и сегодня [2, 6, 7]. Уровень точности применяемой аппаратуры для целей разведки месторождений углеводородного сырья должен обеспечивать уверенное обнаружение аномалий с амплитудой 0,1–0,2 мГал. Перспективной является задача увеличения точности гравиметрических измерений до уровня 0,01–0,05 мГал. Обеспечение перспективной точности возможно при проведении работ, связанных с совершенствованием гиросtabilизаторов (ГС), гравиметрического датчика, увеличением точности обработки гравиметрической информации, методики проведения гравиметрической съемки, увеличением точности навигационной информации о параметрах движения объекта-носителя.

Совершенствование ГС возможно не только при использовании новых чувствительных и исполнительных элементов повышенной точности, но и за счет использования метода комбинированного управления [8], включая компенсацию возмущающих воздействий (особенно при работе на малотоннажных судах в условиях повышенного уровня возмущений). ГС с комбинированным управлением представляет собой объединение в одну систему замкнутой системы управления по отклонению и разомкнутой системы управления по возмущающему воздействию. Принцип компенсации возмущений позволяет существенно повысить точность стабилизации за счет использования информации о внешней ситуации. В работе [9] исследованы различные структурные решения построения цепей компенсации возмущений, действующих на двухосную систему стабилизации в процессе трехкомпонентной качки подвижного объекта. Актуальной является задача разработки способа самонастройки параметров цепей компенсации возмущающих моментов в условиях изменяющегося комплекса влияющих факторов, что обеспечивает эффективное функционирование цепей компенсации.

**Функциональная схема.** Рассмотрим функциональную схему контуров стабилизации ГС с комбинированным управлением и самонастройкой параметров цепей компенсации возмущающих моментов, работающего в режиме гировертикали (рисунок 1). Для формирования компенсирующих сигналов используется информация с дополнительных датчиков угловой скорости (ДУС) и углового ускорения (ДУУ), установленных на основании и наружной раме ГС.

**Математическая модель ГС с комбинированным управлением и самонастройкой параметров.** Математическая модель контуров стабилизации двухосного ГС с комбинированным управлением и самонастройкой параметров имеет вид (1). В уравнениях (1) проекции абсолютной угловой скорости носителя на его главные оси обозначены  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ , где система координат  $x_0y_0z_0$  жестко связанная с основанием.



- 1, 2 – поплавковые интегрирующие гироскопы каналов платформы и наружной рамки, 3 – наружная рамка ГС, 4 – стабилизируемая платформа, 5 – исполнительные двигатели (датчики моментов), 6, 7 – усилители, 8, 9, 10 – ДУС цепей компенсации возмущений, 11, 12, 13 – ДУУ цепей компенсации возмущений, 14, 15 – датчики углов, 16, 17 – вычислители компенсирующих сигналов

Рисунок 1 – Функциональная схема контуров стабилизации ГС с комбинированным управлением

Положение осей гиросtabilизированной платформы с установленной на ней гравиметрической аппаратурой  $x_2y_2z_2$  относительно  $x_0y_0z_0$  задано углами  $\phi_y, \phi_z$ .  $\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2}$  – проекции абсолютной угловой скорости платформы. С наружной рамкой ГС связаны оси координат  $x_1y_1z_1$ .  $M_{ds1}, M_{ds2}$  – моменты, развиваемые стабилизирующими двигателями (датчиками момента) наружной рамки и платформы соответственно,  $M_{bn1}, M_{bn2}$  – возмущающие моменты относительно осей наружной рамки и платформы соответственно,  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции платформы относительно соответствующих осей;  $J_{x1}, J_{y1}, J_{z1}$  – моменты инерции наружной рамки относительно соответствующих осей;  $b_1b_2$  – удельные демпфирующие моменты относительно осей наружной рамки и платформы соответственно,  $K_{ymi}$  – коэффициент передачи усилителя контура стабилизации,  $K_{dsi}$  – коэффициент передачи датчиков момента (ДМ),  $W_{kz1}(p)$ ,  $W_{kz2}(p)$  – передаточные функции корректирующих звеньев контуров стабилизации,  $p$  – оператор дифференцирования,  $T_{ds1}, T_{ds2}$  – электромагнитные постоянные времени датчиков момента;  $K_3, K_4, K_5, K_6$  – коэффициенты передачи цепей компенсации возмущений,  $H$  – кинетический момент поплавкового интегрирующего гироскопа,  $J_\alpha, J_\beta$  – моменты инерции поплавковых интегрирующих гироскопов каналов наружной рамки и платформы соответственно относительно

но осей прецессии,  $\delta, \gamma$  – углы поворота ротора поплавковых гироскопов каналов наружной рамки и платформы относительно осей прецессии,  $W_{kz3}(p), W_{kz4}(p), W_{kz5}(p), W_{kz6}(p)$  – передаточные функции цепей компенсации возмущений,  $K_{dyy(y)}, K_{dyy(x1)}, K_{dyy(z1)}, K_{dys(y)}, K_{dys(x1)}, K_{dys(z1)}$  – коэффициенты передачи ДУУ и ДУС, оси чувствительности которых направлены вдоль осей  $oy, ox_1, oz_1$ .  $T_{dys}, T_{dyy}$  – постоянные времени ДУУ и ДУС,  $\xi_{dyy}, \xi_{dys}$  – коэффициенты демпфирования собственных колебаний ДУУ и ДУС.  $K_\delta, K_\gamma$  – коэффициенты передачи датчиков угла поплавковых гироскопов,  $M_{p\delta}, M_{p\gamma}$  – возмущающие моменты по осям прецессии поплавковых гироскопов. Пренебрегая влиянием гироскопов на движение платформы в виду малости кинетического момента можно записать уравнения:

$$\begin{cases} (J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1})\ddot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z + b_1 \omega_{y2} / \cos \varphi_z - M_{d\delta 1} = \\ = -(J_x - J_z)\omega_{z2}\omega_{x2} \cos \varphi_z - (J_z - J_y)\omega_{z2}\omega_{y2} \sin \varphi_z + M_{bn1} + b_1 \omega_y - \\ - b_1(\omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z) - J_{y1}(\omega_{z2} - \omega_{z1})(\omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y) - \\ - (J_{x1} - J_{z1})\omega_{x1}\omega_{z1} - (J_x + J_{y1})\omega_{x1} \operatorname{tg} \varphi_z - (J_x + J_{y1})(\omega_{z2} - \omega_{z1})(\omega_{x2} \operatorname{tg} \varphi_z \sin \varphi_z + \\ + \omega_{y2} \sin \varphi_z); \\ J_z \ddot{\omega}_{z2} + b_2 \omega_{z2} + M_{dz} = M_{bn2} - b_2(-\omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y) - (J_y - J_x)\omega_{x2}\omega_{y2}, \\ J_a(\ddot{\delta} + \dot{\omega}_{z2}) + b_a \dot{\delta} - H \delta \omega_{z2} - H \omega_{y2} = M_{p\delta}, \\ J_p(\ddot{\gamma} + \dot{\omega}_{y2}) + b_p \dot{\gamma} + H \omega_{z2} + H \gamma \omega_{x2} = M_{p\gamma}, \quad \alpha = \int_0^t \omega_{y2} dt, \quad \beta = \int_0^t \omega_{z2} dt, \quad (1) \\ U_1(p) = K_\delta \delta(p), \quad U_2(p) = K_\gamma \gamma(p), \\ U_3(p) = U_1(p)K_{ym1}W_{kz1}(p), \quad U_4(p) = U_2(p)K_{ym2}W_{kz2}(p), \\ U_5(p) = \omega_y(p) \frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \quad U_6(p) = \omega_y(p) \frac{K_{dys(y)} p}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \\ U_7(p) = \frac{K_6 U_6(p) U_1(p)}{p}, \quad U_8(p) = (U_5(p) + U_6(p))W_{kz3}(p)K_3 U_7(p), \quad K_3 = b_1, \\ U_9(p) = \omega_{x1}(p) \frac{K_{dys(x1)} p}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \quad U_{10}(p) = \omega_{x1}(p) \frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \\ U_{11}(p) = (U_9(p) + U_{10}(p))W_{kz4}(p)K_4 U_7(p), \quad K_4 = b_1 \operatorname{tg} \varphi_z, \\ U_{12}(p) = \omega_{x1}(p) \frac{K_{dys(x1)} p}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} W_{kz5}(p)K_5, \quad K_5 = (J_x + J_{y1}) \operatorname{tg} \varphi_z, \\ U_{13}(p) = \omega_{z1}(p) \frac{K_{dys(z1)} p}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \quad U_{14}(p) = \omega_{z1}(p) \frac{K_{dys(z1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \\ U_{15}(p) = \frac{K_7 U_{14}(p) U_2(p)}{p}, \quad U_{16}(p) = (U_{13}(p) + U_{14}(p))W_{kz6}(p)K_8 U_{15}(p), \\ K_8 = b_2, \quad U_{17}(p) = U_3(p) + U_4(p) - U_{11}(p) - U_{12}(p), \quad U_{18}(p) = U_4(p) + U_{16}(p), \\ T_{d\delta 1} M_{d\delta 1}(p) p + M_{d\delta 1}(p) = K_{d\delta 1} U_{17}(p), \quad T_{d\delta 2} M_{d\delta 2}(p) p + M_{d\delta 2}(p) = K_{d\delta 2} U_{18}(p), \\ \omega_{z1} = \omega_z \cos \varphi_y + \omega_x \sin \varphi_y, \quad \omega_{x1} = \omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y, \\ \omega_{x2} = \omega_x \frac{\cos \varphi_y}{\cos \varphi_z} - \omega_z \frac{\sin \varphi_y}{\cos \varphi_z} + \omega_{y2} \frac{\sin \varphi_z}{\cos \varphi_z}, \quad \dot{\varphi}_z = \omega_{z2} - \omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y, \\ \dot{\varphi}_y = \omega_{y2} / \cos \varphi_z + \omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_y - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z, \quad \varepsilon_{x1} = \dot{\omega}_{x1}. \end{cases}$$

Повышение точности схемы компенсации возмущений достигается за счет самонастройки параметров схемы компенсации. С целью компенсации составляющей момента от вязкого трения  $b_1 \omega_y$  ДУС измеряет угловую скорость  $\omega_y$ . Чтобы исключить отставание компенсирующего момента по отношению к возмущающему из-за инерционности исполнительного двигателя ДУУ

измеряет угловое ускорение  $\dot{\omega}_y$ . При изменении температуры окружающей среды изменяется величина удельного демпфирующего момента  $b_1$  относительно оси вращения наружной рамки, что обуславливает нарушение равенства возмущающего и компенсирующего моментов и появление погрешности стабилизации платформы по оси наружной рамки от момента  $\Delta b_1 \omega_y$  ( $\Delta b_1$  – разность между величиной удельного демпфирующего момента и величиной постоянного коэффициента передачи  $K_3$  цепи компенсации). Погрешность стабилизации от момента  $\Delta b_1 \omega_y$  имеет частоту, равную частоте изменения угловой скорости основания  $\omega_y$  и сдвиг по фазе по отношению к угловой скорости основания  $\omega_y$  стремящийся к нулю. После перемножения сигнала ДУС и сигнала гироскопа по каналу наружной рамки, в котором присутствует гармоника, соответствующая погрешности стабилизации от момента  $\Delta b_1 \omega_y$ , на выходе умножителя содержится постоянная составляющая сигнала и переменная составляющая сигнала. Интегратор с коэффициентом передачи  $K_6$  эффективно сглаживает переменную составляющую сигнала умножителя и осуществляет интегрирование постоянной составляющей сигнала умножителя. В установившемся режиме величина выходного сигнала интегратора равна отношению величины коэффициента вязкого трения в оси вращения наружной рамки к коэффициенту передачи  $K_3$  цепи компенсации. На выходе второго умножителя (сигнал  $U_8$ ) формируется скорректированный компенсирующий сигнал, амплитуда которого вновь равна амплитуде момента от вязкого трения, что приводит к повышению точности двухосной системы стабилизации по каналу наружной рамки. Изменение величины удельного демпфирующего момента по оси наружной рамки приводит также к появлению погрешности стабилизации платформы относительно оси наружной рамки от составляющей момента вязкого трения  $-\Delta b_1 \operatorname{tg} \varphi_z \omega_{x1}$ . После перемножения выходного сигнала звена с коэффициентом передачи  $K_4$  и выходного сигнала интегратора на выходе третьего умножителя (сигнал  $U_{11}$ ) формируется скорректированный компенсирующий сигнал, амплитуда которого вновь равна амплитуде момента  $-\Delta b_1 \operatorname{tg} \varphi_z \omega_{x1}$ , что приводит к повышению точности стабилизации по оси наружной рамки. Описанный способ повышения точности работы схемы компенсации применен и в канале стабилизации по каналу внутренней рамки. Амплитуда погрешности системы стабилизации с комбинированным управлением и самонастройкой параметров

от рассмотренного возмущающего момента в установившемся режиме уменьшается в 180 раз, а время самонастройки параметров цепи компенсации не превышает 2 с.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант №17-08-00434 А.*

#### Литература

1. Ривкин С.С., Береза А.Д. Гироскопическая стабилизация морских гравиметров. – М. : Наука, 1985. – 176 с.

2. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И. и др. / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова; научн. редактор О.А. Степанов. – СПб. : ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 390 с.

3. Форсберг Р. Проведение аэрогравиметрических измерений гравиметрами «ЛАКОСТАРОМБЕРГ» и «ЧЕКАН-АМ» с целью определения геоида / Форсберг Р., Олесен А.В., Эйнарссон И. // Гироскопия и навигация., № 3 (90), 2015. – С. 19–29.

4. Глазко В.В. Морские гравиметрические комплексы и гравиметры гидрографической службы военно-морского флота РФ / Глазко В.В.,

Шустов Е.Б., Филакок И.Н. // Навигация и гидрография. – № 32. – 2011. – С. 79–87.

5. Железняк Л.К. Гравиметры двойного назначения для измерений с морских и воздушных носителей / Железняк Л.К., Конешов В.Н., Несенюк Л.К. и др. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2005. – Т. 48. – № 5. – С. 23–28.

6. Малютин Д.М. Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров / Малютин Д.М. Распопов В.Я. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 9. Ч. 2. – 2017. – С. 96–104.

7. Малютин Д.М. Система для морских гравиметрических измерений повышенной точности с самонастройкой параметров гиросtabilизатора // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 5 (325). – 2017. – С. 147–156.

8. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. С-П. : Профессия., 2004. – 752 с.

9. Малютин Д.М. Гиросtabilизатор гравиметра с комбинированным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 3 (329). – 2018. – С. 123–136.

УДК 004.056

### АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОРТОВЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Медведев Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

Безопасность информационной среды бортового оборудования гражданских воздушных судов является важнейшей составной частью безопасности полетов.

Для составления актуального и отвечающего реалиям списка угроз и атак на бортовую операционную систему (БОС) гражданского воздушного судна (ВС) необходимо в полной мере представлять себе отличительные особенности таких систем, выделяющие их в ряде других ОС.

Рассмотрим эти особенности на примере уже существующих операционных систем реального времени (ОСРВ), использующихся в настоящее время [1]:

- QNX Neutrino,
- VxWorks,
- LynxOS.

Главным требованием к ОСРВ является минимальное время задержки обработки того или иного события. На практике это означает, что должны быть малы следующие параметры:

- время отклика на прерывание – время между фактическим возникновением прерывания

и началом обработки первой инструкции обработчика прерывания;

- время переключения потока управления – время переключения между двумя потоками в одном процессе;
- время переключения контекста процесса (только для ОС, поддерживающих модель процессов) – время переключения между двумя потоками управления, принадлежащими двум различным процессам.

Помимо характеристик времени обработки для ОСРВ важна также стабильность этих характеристик. Именно этот критерий во многом определяет «жесткость» ОСРВ, т. е. предсказуемость времени обработки данных, момента выдачи результатов и т. д.

Важным пунктом можно считать открытость исходных кодов ОСРВ. Открытая ОСРВ имеет явные преимущества с точки зрения ИБ. Кроме этого:

- разработчики прикладного ПО могут разобраться в сложных проблемах без привлечения службы технической поддержки;

- более простая сертификация (на отсутствие закладок и т. д.);
- динамичное развитие, так как в компании-разработчик ОС РВ зачастую приходят не только запросы на исправления ошибок, но и предложения по устранению ошибок, улучшению системы. Сообщества разработчиков, открытых ОС РВ, как правило, растут гораздо быстрее, лучше организованы. Появляются независимые эксперты, помогающие решать задачи службы технической поддержки и участвующие в развитии, отладке и тестировании системы.

В контексте рассмотрения особенностей ОСРВ в системах воздушного движения следует упомянуть, что в настоящее время широкое распространение получают автоматизированные системы управления специального назначения, такие, как системы управления воздушным движением при посадке воздушных судов, обзора летного поля, системы предупреждения столкновений и др., в которых активно используются в качестве источников информации системы ближней радиолокации миллиметрового диапазона волн. Указанные системы функционируют совместно с БОС, решая задачи измерения координат наземных объектов, их селекции и распознавания.

БОС ВС, как правило, работают при наличии случайных и преднамеренных помех.

При формировании перечня угроз БОСРВ ВС необходимо использовать основной современный стандарт стран Европы в области обеспечения информационной безопасности и защиты информации, а именно Стандарт ИСО/МЭК 15408 – 2012.

Такой подход предполагает определить следующие понятия [2]:

- угрозы безопасности;
- политики безопасности;
- предположения безопасности.

Эти действия обычно выполняются в рамках построения Профиля Защиты (ПЗ) на Объект Оценки (в данном случае – БОСРВ ВС. Также для стандартизации требований к разрабатываемому ПО в соответствии с указанным Стандартом следует использовать Задания по Безопасности (ЗБ) и Пакеты защиты.

Определение объекта оценки (ОО) является одним из главных понятий в Стандарте ИСО/МЭК 15408. ОО – это набор программных, аппаратно-программных и/или аппаратных средств, сопровождаемый руководствами пользователя и администратора. ОО может включать ресурсы в виде электронных носителей данных (таких, как основная память, дисковое пространство), периферийных устройств (таких, как принтеры) и вычислительных возможностей (таких, как процессорное время), которые могут

использоваться для обработки и хранения информации и являются предметом оценки.

Фактически, всё воздушное судно (ВС) может рассматриваться как ОО. При этом, однако, в дальнейшем мы разделим перечень угроз на угрозы отдельно для системного программного обеспечения и угрозы для функционального программного обеспечения [3].

Чтобы дать возможность заинтересованным группам или сообществам потребителей выражать свои потребности безопасности и облегчить разработку ЗБ, стандарт ИСО/МЭК 15408 представляет две специальные конструкции: пакеты и профили защиты (ПЗ). Требования безопасности включают две группы требований:

- функциональные требования безопасности (ФТБ): перевод целей безопасности для ОО на некоторый стандартизированный язык. ФТБ определяют правила, по которым ОО управляет использованием и доступом к своим ресурсам и, таким образом, к информации и сервисам, контролируемым ОО.
- требования доверия к безопасности (ТДБ): описание того, каким образом должно быть получено доверие к тому, что ОО удовлетворяет ФТБ.

Пакет – это именованный набор требований безопасности. Пакеты делятся на:

- функциональные пакеты, включающие только ФТБ;
- пакеты доверия, включающие только ТДБ.

Пакет может быть определен какой-либо стороной и предназначен для многократного использования. Для этой цели он должен включать требования, которые в сочетании являются полезными и эффективными.

Доверие – основа для уверенности в том, что продукт ИТ отвечает целям безопасности. Доверие могло бы быть получено путем обращения к таким источникам, как бездоказательное утверждение, предшествующий аналогичный опыт или специфический опыт. Однако ИСО/МЭК 15408 обеспечивает доверие с использованием активного исследования. Активное исследование БОС – это определение ее свойств безопасности.

### Литература

1. «Comparison between QNX RTOS V6.1, VXWORKS AE 1.1 and WINDOWS CE .NET», Dedicated Systems Experts NV, June 21, 2002.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2012 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Москва, Издательство «Стандарты», 2013.
3. LynxOS. Электронный ресурс, режим доступа: <http://www.rtsoft.ru/catalog/os/osrv/detail/>.

УДК 681.2

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Микитевич В.А., Свистун А.И., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время являются актуальными вопросы определения характеристик полупроводниковых пластин бесконтактными методами. Использование контактных методов приводит к нарушениям поверхностных слоев пластин, что не позволяет их возврат в технологический процесс. Зондовые зарядочувствительные методы основаны на регистрации электрического потенциала поверхности с помощью бесконтактного емкостного зонда (например, зонда Кельвина [1–4]). Они позволяют выявлять различные неоднородности (наличие дефектов, механических напряжений, неоднородностей химического состава и др.) как в металлах, так и в полупроводниках.

В емкостных зондах для модуляции потенциала используются механические колебания эталонного образца, образующего с измеряемой поверхностью конденсатор. В отличие от металлов, в полупроводниках присутствует фото-ЭДС, что позволяет использовать емкостные зонды с модуляцией потенциала светом, без механических колебаний.

Таким образом, емкостной зонд может быть использован в двух режимах: (а) с механической модуляцией для измерения потенциала и (б) со световой модуляцией для измерения фото-ЭДС.

В свою очередь, по фото-ЭДС возможно определение таких параметров полупроводников, как время жизни носителей заряда в приповерхностном слое, высота потенциального барьера, токи утечки барьерной структуры, диффузионная длина носителей заряда, удельное поверхностное сопротивление и др. [5].

Целью настоящей работы является разработка универсального цифрового измерителя, позволяющего измерять как потенциал поверхности, так и фото-ЭДС с дополнительными опциями (режим определения диффузионной длины носителей и режим определения удельного поверхностного сопротивления, а также определение производных от этих параметров величин).

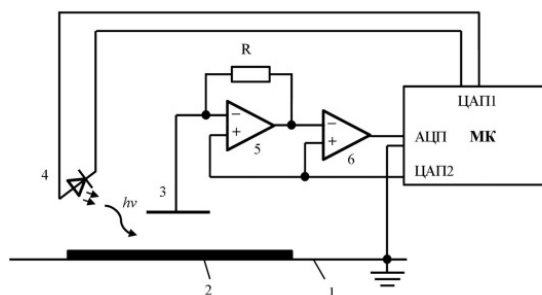
В основе измерителя использован микроконтроллер с ядром Cortex M4 типа STM32L476.

Данный микроконтроллер имеет низкий уровень собственных шумов, а также улучшенный аналоговый блок, позволяющий в режиме оверсэмплинга получать данные с АЦП вплоть до 24 бит. Также он имеет встроенный арифметический сопроцессор, что позволяет проводить первичную обработку данных с плавающей запятой (вычисление среднеквадратичного значения сигналов, фильтрацию, БПФ и др.) в реальном времени.

Рассмотрим конструкцию измерителя. На рисунке 1 показана упрощенная структурная схема универсального цифрового измерителя для фотостимулированной зондовой электрометрии. Конструкция измерителя состоит из следующих основных узлов: на заземленном основании 1 располагается исследуемый образец 2 (например, полупроводниковая пластина). Исследуемый образец 2 и зонд 3 образуют плоский конденсатор. В цепи обратной связи электрометрического усилителя 5 установлен резистор R с гигаомным сопротивлением. Для согласования уровня выходного сигнала со входом АЦП микроконтроллера (МК) использован инструментальный усилитель 6. ЦАП2 МК используется для генерации напряжения компенсации. ЦАП1 используется для управления яркостью светодиода 4.

В зависимости от заданного режима работы, МК включает соответствующую модуляцию зонда (механические колебания или модулированный свет), а также необходимые для каждого режима каналы и режимы считывания получаемых сигналов.

Работа измерителя осуществляется следующим образом: при освещении поверхности исследуемого образца (полупроводниковой пластины) происходит генерация носителей заряда. Следовательно, возникает заряд в зонде, который преобразуется в напряжение электрометрическим усилителем и усиливается инструментальным усилителем. При этом измерение осуществляется компенсационным методом. Микроконтроллер управляет напряжением компенсации при помощи ЦАП2 и яркостью светодиода при помощи ЦАП1.



1 – заземленное основание; 2 – исследуемый образец; 3 – зонд; 4 – светодиод; 5 – электрометрический усилитель; 6 – инструментальный усилитель; R – резистор с гигаомным сопротивлением; МК – микроконтроллер; hv – световой поток

Рисунок 1 – Структурная схема универсального цифрового измерителя для фотостимулированной зондовой электрометрии:

При разработке измерителя учитываются следующие нюансы:

1) зависимость фото-ЭДС от освещенности не линейна, что требует дополнительных исследований с целью подбора оптимальных режимов работы измерителя;

2) измерения целесообразно проводить на переменном токе (при изменяющейся яркости светодиода), что позволяет значительно упростить выделение полезного сигнала при наличии шумов и наводок;

3) зависимость яркости светодиода от напряжения не линейна, следовательно, ЦАП микроконтроллера должно иметь токовый выход;

4) светодиод должен освещать поверхность исследуемого образца под зондом, поэтому необходимо использовать соответствующую конструкцию световода и зонда;

5) большое значение имеет угол падающих лучей света из-за наличия эффекта отражения на границе воздух-исследуемый образец;

6) определения диффузионной длины носителей заряда необходимо наличие двух источников излучения, с разными длинами волн [5];

7) необходимо экранирование от внешних источников светового излучения.

Универсальный цифровой измеритель для фотостимулированной зондовой электрометрии может быть использован для исследования характеристик полупроводниковых пластин при

научных исследованиях, а также в процессе производства.

### Литература

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. In Book: Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – pp. 687–720.

2. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов / Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.

3. Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л. Малогабаритный аналоговый измеритель контактной разности потенциалов. / Приборостроение–2016: Материалы 9-й МНТК. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 97–99.

4. Микитевич В.А., Жарин А.Л. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов. / Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й МНТК молодых ученых и студентов. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 63.

5. Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Пилипенко В.А., Петлицкий А.Н. Реализация режима модулированной поверхностной фотоэдс в конструкции средств неразрушающего контроля полупроводниковых пластин. / Приборостроение–2017: Материалы 10-й МНТК. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 83–84.

УДК 539.1.074.3/6

### ФОСВИЧ-ДЕТЕКТОР ЛЕГКИХ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

Лобко А.С.<sup>1</sup>, Мисевич О.В.<sup>1</sup>, Федоров А.А.<sup>1</sup>, Кучинский Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

Проблема спектрометрии и идентификации легких ионов (до  $Z \sim 10$ ) на фоне гамма-квантов и электронов часто встает как в научных экспериментах на пучках заряженных частиц, так и в промышленных установках с использованием ускоренных ионов. Такие задачи решались с помощью газовых пропорциональных и полупроводниковых детекторов, однако их эффективность регистрации и быстродействие не позволяют работать на интенсивных пучках. Для преодоления этого ограничения нами был разработан двухслойный сцинтилляционный детектор-фосвич – с повышенным быстродействием и близкой к 100 % эффективностью регистрации заряженных частиц.

Фосвич-детекторы применялись и ранее для измерения поверхностной загрязненности альфа- и бета-активными радионуклидами, где внешний слой поглощает альфа-частицы, второй слой – бета-, и третий слой (при наличии) – гамма-кванты. В качестве альфа-чувствительного слоя практиче-

ски всегда применялся тонкий поликристаллический сцинтиллятор ZnS:Ag. Но его быстродействие невелико, и энергетическое разрешение, как и стойкость к климатическим и химическим воздействиям оставляют желать лучшего. После аварии на АЭС в г. Фукусима (Япония) вновь возникла потребность в подобных приборах.

Для преодоления указанных недостатков в качестве фронтального слоя фосвича нами был применен кристалл алюмината иттрия  $YAlO_3:Ce$  (известный также как YAP) [1] в сочетании с пластическим сцинтиллятором во втором слое. Оба сцинтиллятора имеют малые постоянные времена высвечивания – 28 нс и 5 нс соответственно. Диаметр детектора – 60 мм, толщина YAP – 250 мкм, толщина пластика – 6 мм (может быть снижена до 2 мм для низкофоновой радиометрии). Сцинтилляторы оптически связаны с фотоприемником ФЭУ Hamamatsu R11102 посредством световода с конической образующей. Электроника детектора содержит в себе подсистему питания ФЭУ, блок



усиления и спектрометрического формирования сигнала, а также блок анализа формы импульсов для разделения сигналов от слоев фосвича по времени высвечивания. Детектор подключается к многоканальному анализатору на линии с компьютером, поддерживающему одновременное накопление двух спектров.

**Работа детектора при спектрометрии ионов.** При сравнительно низких энергиях ионов (единицы МэВ) они полностью поглощаются во фронтальном слое сцинтиллятора. Спектр альфа-частиц от источника  $^{226}\text{Ra}$  приведен на рис. 1.

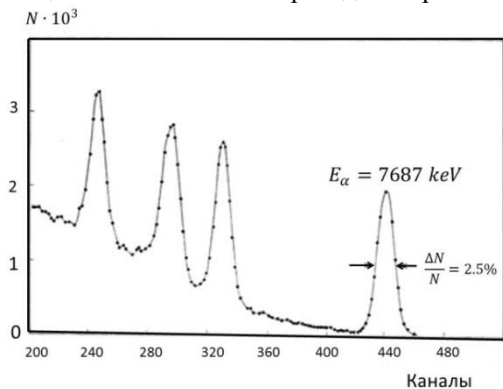


Рисунок 1 – Спектр  $\alpha$ -частиц от источника  $^{226}\text{Ra}$

Энергетическое разрешение детектора при измерении альфа-излучения составляет 2,5 % по пику с энергией  $E_\alpha = 7687$  МэВ, непропорциональность – менее 1 %, что существенно лучше, чем для  $\text{ZnS:Ag}$ .

Сигнал на выходе ФЭУ при возбуждении альфа-частицами полностью определяется кинетикой высвечивания  $\text{YAP:Ce}$  (рис. 2).

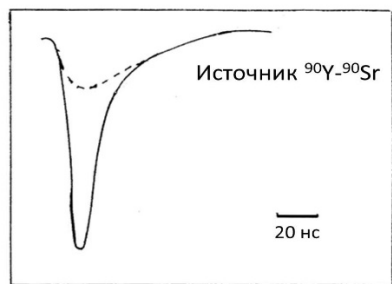


Рисунок 2 – Выходной сигнал ФЭУ от  $\alpha$ -частиц

При высоких энергиях ионов (десятки МэВ) во фронтальном слое детектора будет выделяться лишь часть энергии, и появится выделение энергии в слое пластика. По соотношению энерговыделения в слоях фосвича с помощью блока анализа формы импульсов возможно проводить идентификацию ионов с использованием известных зависимостей плотности ионизации вещества от параметров заряженных частиц.

**Работа детектора при регистрации электронов.** При достаточно высокой энергии ( $> \sim 0.5$  МэВ) электроны теряют часть своей энергии во фронтальном слое фосвича и попадают во второй слой. При этом форма выходного сигнала

ФЭУ определяется кинетикой сцинтилляций как  $\text{YAP:Ce}$ , так и пластического сцинтиллятора (рис. 3).

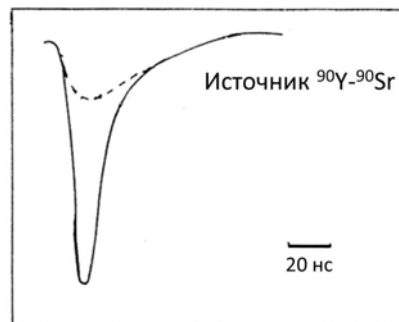


Рисунок 3 – Выходной сигнал ФЭУ от  $\beta$ -частиц

Спектр энерговыделения  $\beta$ -частиц во фронтальном слое  $\text{YAP:Ce}$  приведен на рис. 4 вместе с пиком  $\alpha$ -частиц от источника  $^{238}\text{Pu}$ .

На рис. 4 видно частичное перекрытие спектров, поэтому использование логики отбора событий путем анализа формы суммарного сигнала от двух слоев фосвича является необходимым для идентификации частиц.

**Применение детектора в альфа-бета радиометре поверхностей.** Было проведено испытание детектора для измерения поверхностной загрязненности альфа- и бета-активными радионуклидами. Импульсная чувствительность к потоку альфа-излучения от поверхности составила не менее  $0,2$  (имп/с)/(част./мин·см<sup>2</sup>). Фоновая скорость счета при уровне внешнего гамма-фона  $0,12$  мкЗв/ч составила  $0,03$  имп/с. Это позволяет измерять поверхностную загрязненность альфа-активными нуклидами при статистической погрешности 20 % и доверительном интервале  $0,95$  от  $1$  част./мин·см<sup>2</sup> за время 2 мин.

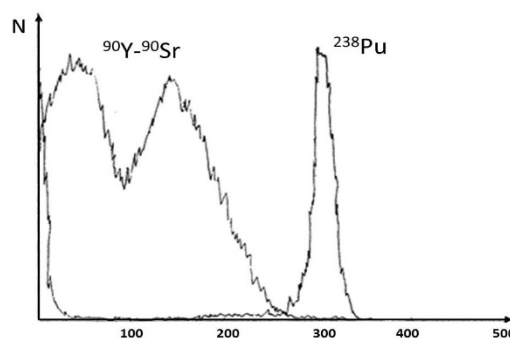


Рисунок 4 – Спектр энерговыделения  $\beta$ -частиц источника  $^{90}\text{Y}+^{90}\text{Sr}$  в  $\text{YAP:Ce}$

Импульсная чувствительность к потоку бета-излучения от поверхности составила не менее  $0,25$  (имп/с)/(част./мин·см<sup>2</sup>). Фоновая скорость счета при уровне внешнего гамма-фона  $0,12$  мкЗв/ч составила  $3$  имп/с. Это позволяет измерять поверхностную загрязненность бета-активными нуклидами при статистической по-

грешности 20 % и доверительном интервале 0,95 от 10 част./мин·см<sup>2</sup> за время менее 1,5 мин.

Верхний предел измерения определяется электроникой и наиболее медленным из сцинтилляторов и составляет  $3 \cdot 10^5$  част./мин·см<sup>2</sup>.

Тестовые измерения на пучках ионов высоких энергий планируется провести на ускорительном комплексе ОИЯИ (г. Дубна, РФ).

**Заключение.** Продемонстрирована работа быстродействующего двухслойного фосвич-детектора на базе сцинтилляционного кристалла УАР:Се и пластического сцинтиллятора, пер-

спективного для спектрометрии и идентификации легких ионов. Также показана его применимость для измерения поверхностной загрязненности альфа- и бета-активными радионуклидами.

#### Литература

A. Fedorov, A. Lobko, O. Missevitch / Novel fast-acting scintillation detectors for wide energy range applications // Advanced Radiation Sources and Applications / Ed. by H. Wiedemann. NATO Science series II, Mathematics, Physics and Chemistry. vol. 199, Springer, 2006.

УДК 614.842

### РАСЧЕТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАДЕРЖЕК ОПОВЕЩЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ

Мисюкевич Н.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Вступающий в силу с 01.01.2020 технический регламент ТР ЕАЭС 043/2017 [1] определил, что система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) – совокупность технических средств, предназначенных для информирования людей о возникновении пожара, необходимости эвакуироваться, путях и очередности эвакуации. Таким образом, можно утверждать, что не может существовать систем оповещения без решения задач управления эвакуацией людей при пожаре. Введенный в действие 01.09.2018 технический кодекс установившейся практики ТКП 45-02-317-2018 [2], к сожалению, использует старый термин и определение системы: «Система оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией – совокупность технических средств, предназначенных для сообщения людям информации о возникновении пожара или другой чрезвычайной ситуации и порядке действий при эвакуации». Примененное в ТКП 45-02-317-2018 [2] сокращенное обозначение системы «СО» уже негативно отразилось на практике создания систем: делается только часть системы (оповещение), а управление эвакуацией не рассматривается в создаваемой документации. Таким образом осуществляется реализация оборудования неспособного управлять эвакуацией в виду отсутствия алгоритмов осуществления данной целевой задачи.

Методика расчета параметров эвакуации, приведенная в приложении 2 межгосударственного стандарта ГОСТ 12.1.004 [3], предусматривает необходимость учета времени задержки движения людей из-за образования скопления и, так же как и другие технические нормативные правовые акты (ТНПА), не дает никаких указаний и формул для его расчета.

Автором обоснована формула для расчета времени задержки эвакуации людей. Задержка эвакуации происходит при превышении предельной плотности потока. При этом интенсивность движения резко сокращается, уменьшается примерно в два раза в сравнении с движением при нормируемых параметрах. Это схоже с процессом образования «пробки» при движении автомобильного транспорта.

Для расчета времени задержки движения при эвакуации  $t_{здр}$ , мин, необходимо использовать следующую формулу (1)

$$t_{здр} = \frac{Nf}{0,9q_i \delta_i}, \quad (1)$$

где  $N$  – число людей в скоплении, чел;  $f$  – средняя площадь горизонтальной проекции человека, м<sup>2</sup>;  $0,9$  – коэффициент пропорциональности, численно равный максимально допустимой плотности потока;  $q_i$  – значение интенсивности движения людского потока по рассматриваемому  $i$ -му участкам пути, чел\*м/мин;  $\delta_i$  – ширина рассматриваемого  $i$ -го участка пути, м.

Значения входящих в формулу параметров следует принимать по таблице 2 приложения 2 ГОСТ 12.1.004 [3] при максимально допустимой плотности потока в зависимости от вида пути эвакуации.

Следует отметить, что существующие ТНПА никак не определяют допустимость задержки эвакуации. Анализ и натурные наблюдения показывают, что задержка эвакуации допустима лишь в помещениях, откуда люди начинают движение при эвакуации. Задержка эвакуации на последующих общих путях эвакуации недопустима и может приводить к трагическим последствиям: падению людей (эффект «домино»), затаптыванию, раздавливанию. Печальный при-

мер этому – трагедия в подземном переходе станции метро «Немига» в 1999 году.

Избежать задержек движения на общих путях эвакуации можно применяя задержки оповещения об эвакуации отдельных зон и, тем самым, управляя плотностью людского потока за пределами начальных участков движения.

При наличии двух и более эвакуационных выходов с этажа возникает необходимость определения ситуаций блокирования одного из эвакуационных выходов опасными факторами пожара (ОФП). Очевидно, что это возможно лишь в случае выделения помещений этажа в отдельные зоны. Если эти помещения выходят в разные коридоры (общий коридор разделен перегородками с дверями), зоны управления эвакуацией могут учитывать такое архитектурное решение и ограничиваться помещениями, выходящими в конкретный коридор. Если коридор один, его в любом случае целесообразно выделять в отдельную зону и такое зонирование использовать для сокращения случаев задействования СОУЭ по ложным сигналам о пожаре от систем пожарной сигнализации (СПС).

Наиболее сложная расчетная ситуация эвакуации при первоначальном появлении ОФП в коридоре. Исходя из критерия безопасности (2) за расчетное время эвакуации по коридору следует обеспечить эвакуацию всех людей из всех помещений, выходящих в данный коридор.

Критерием безопасности процесса эвакуации является соблюдения соотношения:

$$t_p \leq t_n - t_c, \quad (2)$$

где  $t_p$  – расчетное время эвакуации;

$t_n$  – необходимое время эвакуации;

$t_c$  – время свободного развития пожара до начала эвакуации.

При использовании СПС  $t_c$  принимают равным нулю. Соответственно, максимально допустимое время задержки выдачи сигнала на начало эвакуации  $t_3$  определяется из равенства (3)

$$t_3 = t_n - t_p \quad (3)$$

Анализ поступающих сообщений по системам передачи извещений о пожаре и неисправности в настоящее время показывает, что действительным сигнал «Пожар» является лишь в менее 1 % случаев. Важно не нарушать нормальную жизнедеятельность людей при формировании ложных сигналов «Пожар» СПС. Для обеспечения возможности проверки поступающих сообщений оперативным персоналом и соблюдения критерия безопасности (2) изначально целесообразно определить и запрограммировать СОУЭ с максимально допустимыми задержками включения оповещения зон в зависимости от места формирования сообщения.

Алгоритм формирования задержек начала оповещения представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Структурная схема алгоритма формирования максимальных задержек оповещения зон эвакуации

| Зона пожара | Время подачи сигнала об эвакуации в зоны |                         |                         |
|-------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             | 1                                        | 2                       | 3                       |
| 1           | $t_3^1 = t_n^1 - t_p^1$                  | $t_3^2 = t_n^1$         | $t_3^3 = t_n^1 + t_n^2$ |
| 2           | $t_3^1 = t_n^2$                          | $t_3^2 = t_n^2 - t_p^2$ | $t_3^3 = t_n^2$         |
| 3           | $t_3^1 = t_n^2 + t_n^3$                  | $t_3^2 = t_n^3$         | $t_3^3 = t_n^3 - t_p^3$ |

В условиях подтверждения достоверности возникновения пожара стоит задача максимально быстрой эвакуации людей с места пожара и обеспечения успешности действий пожарных аварийно-спасательных подразделений. В этих условиях задержки оповещения о начале эвакуации предназначены для формирования людского потока и исключения задержек его движения на общих путях эвакуации. Структурная схема алгоритма формирования минимальных задержек оповещения зон эвакуации представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Структурная схема алгоритма формирования минимальных задержек оповещения зон эвакуации

| Зона пожара | Время подачи сигнала об эвакуации в зоны |                        |                        |
|-------------|------------------------------------------|------------------------|------------------------|
|             | 1                                        | 2                      | 3                      |
| 1           | $t_3^1 = 0$                              | $t_3^2 = \sum_1^2 t_p$ | $t_3^3 = \sum_1^3 t_p$ |
| 2           | $t_3^1 = \sum_1^2 t_p$                   | $t_3^2 = 0$            | $t_3^3 = \sum_2^3 t_p$ |
| 3           | $t_3^1 = \sum_1^3 t_p$                   | $t_3^2 = \sum_2^3 t_p$ | $t_3^3 = 0$            |

Устойчивая и надежная работа СОУЭ возможна при минимизации ее задействования по ложным сообщениям о пожаре. Выделение коридоров в отдельные зоны контроля ОФП и управления эвакуацией с соблюдением критерия безопасности (2) позволяет ограничить нарушение нормальной жизнедеятельности людей в помещениях и регулировать возможное время подтверждения сообщения о пожаре дежурным персоналом. С этой целью немедленное задействование СОУЭ допускается лишь при поступлении сигналов об обнаружении ОФП в коридоре. По сигналам из других зон допустимо не задействовать СОУЭ, подтверждая соблюдение условий безопасности расчетом.

Вывод: следует восстановить ранее существовавшую практику применения тепловых пожарных извещателей максимального действия в по-

мещений по результатам оценки технической и экономической эффективности таких решений.

### Литература

1. О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения: ТР ЕАЭС 043/2017. – Введ. 01.01.2020 [Электронный ресурс] / ЕЭК. – Режим доступа: <http://tnpa.by/#!/DocumentCard/378586/507146>. – Дата доступа: 21.09.2018.

2. Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования. ТКП-45-2.02-317-2018. – Введ. 01.09.2018 [Электронный ресурс] / Нац. фонд ТНПА. – Режим доступа: <http://tnpa.by/#!/DocumentCard/395628/525125>. – Дата доступа: 21.09.2018.

3. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – Минск : Госстандарт, 2008. – 65 с.

УДК 004.942

## МЕТОД СИНТЕЗА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В РЛС С ЛИНЕЙНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**Введение.** В РЛС с линейным сканированием луча угловая разрешающая способность определяется шириной диаграммы направленности (ДН) антенны [1]. Традиционным путем ее увеличения является повышение размеров апертуры антенны [2], что ограничивается техническими возможностями. Достичь увеличения угловой разрешающей способности можно путем использования специальных методов обработки принятых сигналов, позволяющих синтезировать диаграмму направленности с желаемой шириной. Цель работы состояла в разработке метода синтеза диаграммы направленности в РЛС с линейным сканированием луча и амплитудной обработкой сигналов.

**1. Формулировка задачи.** Диаграмма направленности антенны РЛС с шириной луча  $2\gamma$  изображена на рис. 1 сплошной кривой.

Полагаем, что сканирование осуществляется по часовой стрелке с центром в точке  $O$  и угловой скоростью  $\omega^\circ$  (градус/с), а положения оси ДН в дискретные моменты времени  $k = 0, 1, 2, \dots$  показаны на рис. 1 штриховыми линиями для моментов  $k-n, k-n+1, \dots, k$ , где  $n$  – нечетное число положений оси в пределах угла  $2\gamma$ . В качестве оси синтезированной ДН в момент  $k$  принимается направление, соответствующее моменту  $0,5(k+1)\tau$ , где  $\tau$  – интервал времени между измерениями. В дальнейшем этот интервал полагается равным единице. Угловые положения ДН относительно этой оси в различные моменты времени обозначаются через  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ . Пусть направление прихода волны от объекта находится под постоянным углом  $\vartheta$ . Функция, описывающая  $i$ -ю ДН, обозначается  $f_i(\vartheta - \alpha_i)$ , которая в частном случае может быть одинаковой для всех значений  $i$ . Эта функция полагается четной, т. е.  $f(\vartheta - \alpha_i) = f(-\vartheta + \alpha_i)$ , и нормированной  $f(0) = 1$ . Амплитуда сигнала на выходе линейного приемника имеет величину  $u_i(\vartheta) = u f_i(\vartheta - \alpha_i)$ , где  $u$  является амплитудой сигнала от объекта на входе.

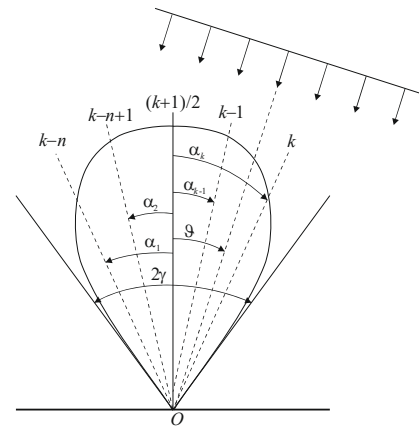


Рисунок 1 – Диаграмма направленности антенны РЛС и положения ее оси в дискретные моменты времени

Для получения синтезированной ДН обработка сигналов осуществляется за интервал времени  $n$ . Посредством цепочки из линий задержки на один интервал измерений, равный единице, накапливается  $n$  измерений (момент  $k$  на рис. 1). Каждый сигнал умножается на весовой коэффициент  $K_i$  и затем эти результаты суммируются, образуя итоговый сигнал  $\sum_{i=1}^n K_i f_i(\vartheta - \alpha_i)$ . Синтезированная диаграмма направленности (СДН)  $F(\vartheta)$  определяется формулой:

$$F(\vartheta) = \sum_{i=1}^n K_i f_i(\vartheta - \alpha_i). \quad (1)$$

Задача исследования состояла в выборе коэффициентов  $K_i$ , удовлетворяющих определенному критерию оптимальности, обеспечивающему повышение угловой разрешающей способности.

**2. Алгоритм синтеза диаграмм направленности.** Решение поставленной задачи предполагает использование совокупности из  $n$  сигналов. Критерием оптимальности является условие минимизации функции потерь, учиты-

вающей необходимость получения СДН с шириной  $2\beta$  меньшей, чем у исходной ДН, равной  $2\gamma$ . Задача синтеза может быть решена методом наименьших квадратов [3]. В этом случае используется квадратичная функция потерь, состоящая из двух частей: квадратичной функции минимизации и линейных ограничений.

Предполагаем, что шумы на выходе приемника являются дискретным белым шумом статистически независимым в различные моменты времени  $k$  и одинаковыми дисперсиями. Тогда дисперсия белого шума на выходе схемы будет пропорциональна сумме квадратов весовых коэффициентов:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n K_i^2. \quad (2)$$

Величина  $\delta$  определяет изменение отношения сигнал/шум на выходе. В качестве квадратичной составляющей функции потерь можно выбрать функцию  $\delta^2$ , обеспечивающую минимизацию дисперсии шумов на выходе.

В дополнение к ней можно предложить ряд функций ограничений. Во-первых, для получения центрированной СДН ( $F(9=0)=1$ ) необходимо выполнение равенства, вытекающего из формулы (1):

$$\sum_{i=1}^n K_i f_i(\alpha_i) = 1. \quad (3)$$

Ширину  $2\beta$  будем определять расстоянием между ближайшими точками пересечения функции СДН нулевого уровня, т. е. между точками появления первых боковых лепестков. Тогда в качестве второго ограничения используется равенство:

$$\sum_{i=1}^n K_i f_i(\pm\beta - \alpha_i) = 0. \quad (4)$$

Минимизация квадратичной функции (2) при линейных ограничениях (3) и (4) осуществляется методом неопределенных множителей Лагранжа. В этом случае функция потерь принимает вид:

$$J(K) = \sum_{i=1}^n K_i^2 + \lambda_1 \left[ \sum_{i=1}^n K_i f_i(\alpha_i) - 1 \right] + \lambda_2 \left[ \sum_{i=1}^n K_i f_i(\beta - \alpha_i) \right] + \lambda_3 \left[ \sum_{i=1}^n K_i f_i(-\beta - \alpha_i) \right], \quad (5)$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , и  $\lambda_3$  – неопределенные множители. Оптимальные весовые коэффициенты  $K_j$  находятся путем минимизации функции потерь (5) и имеют вид:

$$K_i = -\frac{1}{2} \left[ \lambda_1 f_j(\alpha_j) + \lambda_2 f_j(\beta - \alpha_j) + \lambda_3 f_j(-\beta - \alpha_j) \right], \quad (6)$$

где множители  $\lambda$  задаются формулами:

$$\lambda_1 = -2 \left[ a_n - \frac{c_n^2 d_n^2 - 2c_n d_n e_n g_n + b_n c_n e_n^2}{c_n (b_n c_n - g_n^2)} \right]^{-1};$$

$$\lambda_2 = -\lambda_1 \left( \frac{c_n d_n - e_n g_n}{b_n c_n - g_n^2} \right);$$

$$\lambda_3 = -\lambda_1 \frac{1}{c_n} \left( e_n - g_n \frac{c_n d_n - e_n g_n}{b_n c_n - g_n^2} \right).$$

Здесь используются следующие обозначения:

$$a_n = \sum_{i=1}^n f_i^2(\alpha_i); \quad b_n = \sum_{i=1}^n f_i^2(\beta - \alpha_i);$$

$$c_n = \sum_{i=1}^n f_i^2(-\beta - \alpha_i); \quad d_n = \sum_{i=1}^n f_i(\alpha_i) f_i(\beta - \alpha_i);$$

$$e_n = \sum_{i=1}^n f_i(\alpha_i) f_i(-\beta - \alpha_i);$$

$$g_n = \sum_{i=1}^n f_i(\beta - \alpha_i) f_i(-\beta - \alpha_i).$$

С учетом полученных значений  $\lambda$  оптимальные весовые коэффициенты находятся по формулам (6), что обеспечивает минимальное значение дисперсии шумов и ширину СДН, равную  $2\beta$ . Однако следует отметить, что в результате синтеза отношение сигнал/шум на выходе по отношению к этой величине на входе каждого канала уменьшится в  $\delta$  раз и, кроме того, увеличится амплитуда боковых лепестков СДН. При этом измерения угловых координат происходят с запаздыванием на время  $\gamma \cdot \omega$ . Эти факторы являются «платой» за повышение угловой разрешающей способности.

### Заключение

Предложенный метод позволяет синтезировать диаграммы направленности антенн с заданной шириной в РЛС с линейным сканированием луча и амплитудной обработкой сигналов. Это достигается путем многоканальной обработки сигналов с последовательным их измерением в процессе сканирования. Сигналы на выходе каналов взвешиваются посредством весовых коэффициентов и затем суммируются, образуя синтезированную диаграмму направленности. Метод синтеза основан на оптимальном выборе весовых коэффициентов по критерию минимума дисперсии шумов на выходе при заданной ширине диаграммы направленности. Решение поставленной задачи приводит к уменьшению отношения сигнала к шумам и росту амплитуд боковых лепестков диаграммы направленности.

### Литература

1. Справочник по радиолокации : в 2 кн. / под ред. М.И. Скольника. – М. : Техносфера, 2014. – Кн. 1. – 672 с.
2. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Фомин, В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. – М. : Наука, 1984. – 288 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗВИТИИ ПОЖАРА В ОГРАЖДЕНИЯХ

Невдах В.В., Антошин А.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Принято считать, что отличие пожаров в ограждениях от пожаров в открытом пространстве обусловлено двумя факторами (см. [1, 2]):

1) обратным тепловым потоком от нагретых поверхностей конструкций ограждения и нагретого слоя дыма на поверхности горючих материалов;

2) наличием открытых проемов в ограждениях, через которые осуществляется естественная вентиляция помещений, обеспечивающая поступление в помещение свежего воздуха.

Для техники противопожарной безопасности наибольший интерес представляет начальная стадия пожара, предшествующая стадии полного охвата помещения пламенем, когда основной целью является безопасность людей. Чем длиннее эта стадия, тем больше шансов для безопасной эвакуации людей из ограждений. В современной литературе, посвященной исследованию пожаров в ограждениях, считается, что после инициирования и на начальной стадии такой пожар контролируется горючим материалом (топливом), так как в это время существует достаточное количество кислорода для горения и рост пожара полностью зависит от характеристик топлива и его геометрии (см., например, [1, 2]). Если пожар дорастает до стадии полного охвата, он может стать контролируемым вентиляцией, когда существующее количество кислорода, недостаточное для сгорания большинства топлива, образующегося в результате пиролиза твердых материалов. Тепловыделение пожара тогда определяется количеством кислорода, входящего через открытые проемы помещения, и поэтому пожар называют контролируемым вентиляцией. На стадии затухания пожара, горение возвращается в режим, контролируемый топливом. Также принято считать, что на развитие пожара в ограждениях влияют: размер и положение источника возгорания; тип, количество, положение, пространственное распределение, ориентация, площадь поверхности пакетов топлива; геометрия ограждений; размеры и положение открытых проемов помещения; свойства материалов конструкций ограждения.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование пожара в ограждениях и исследование влияния газодинамики на развитие пламенного горения в ограждениях.

Моделирование выполнялось с использованием специализированной программы FDS (Fire Dynamics Simulator) [3, 4]. С помощью графического интерфейса PyroSim в расчетной сетке, состоящей из кубических ячеек с ребром 0.1 м, была создана модель ограждения – помещения с внутренними размерами 4.2×3.8×2.4 м, в котором находятся диван, кресло и другие предметы

из горючего материала (см. рисунок 1). Пожар инициировался источником с размерами 0.1×0.1 м и с тепловыделением 10 кВт, помещаемым на сидение дивана рядом со спинкой. Горение горючего материала моделировалось реакцией горения полиуретана – материала, используемого при изготовлении мягкой мебели [5]. Моделировались 1200 секунд горения вышеуказанных предметов в открытом пространстве и в ограждениях с различными условиями естественной вентиляции. Контролировались массовая скорость горения, величина полного тепловыделения, температура воздуха и изменение его давления.

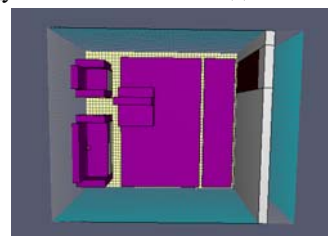


Рисунок 1 – Модель помещения

На рисунке 2 представлены зависимости тепловыделения от времени при горении одного и того же материала (полиуретана) в открытом пространстве, под навесом, роль которого играет потолок, в комнате с естественной вентиляцией через проемы на месте торцевых стен.

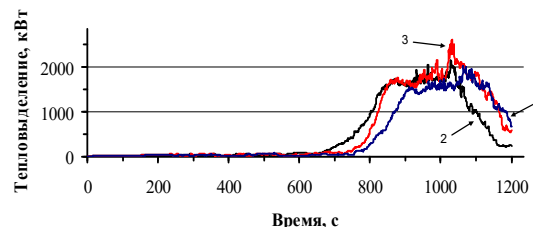


Рисунок 2 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре в открытом пространстве (1), под навесом (2) и в помещении с проемами на месте торцевых стен (3)

Из этого рисунка видно, что в трех рассмотренных случаях отличия в условиях горения мало сказываются на динамике тепловыделения пожара.

На рисунке 3 представлены зависимости температуры воздуха на высоте 2.2 м в центре помещения от времени для трех рассмотренных пожаров. Видно, что при пожаре в помещении в рассматриваемых условиях повышение температуры воздуха в центре помещения под потолком начинается после достижения факелом пламени потолка и образования припотолочной струи, тогда как при пожаре в открытом про-

странстве повышения температуры воздуха в этом же месте практически нет из-за того, что восходящий поток горячего воздуха и дыма находится в стороне от контролируемой точки.

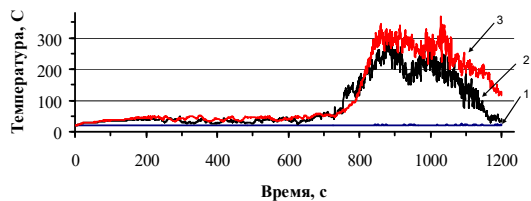


Рисунок 3 – Зависимости температуры воздуха на высоте 2.2 м в центре помещения от времени при пожаре в открытом пространстве (1), под навесом (2), в помещении с проемами на месте торцевых стен (3)

На рисунке 4 представлены зависимости тепловыделения от времени при пожарах в комнате с различными условиями естественной вентиляции: через отсутствующие две боковые стены, дальнюю от источника пожара торцевую стену, ближнюю торцевую стену, ближнюю торцевую стену и дверь в дальней торцевой стене, отсутствующие две торцевые стены.

Моделирование показало, что условия естественной вентиляции влияют на динамику тепловыделения при пожаре через формирование газодинамических потоков, обеспечивающих поступление свежего воздуха и удаление нагретого дыма и продуктов сгорания. Из рисунка 4 видно, что максимальные тепловыделения в рассмотренных случаях отличаются почти на порядок величины и достигаются в сильно отличающиеся моменты пожаров.

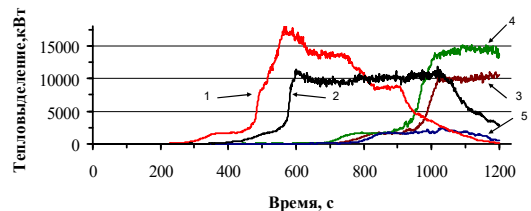


Рисунок 4 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре в помещении: с проемами на месте боковых стен (1), дальней торцевой стены (2), ближней торцевой стены (3), ближней торцевой стены и двери (4), торцевых стен (5)

Зависимости температуры воздуха на высоте 2.2 м в центре помещения от времени для этих пожаров представлены на рисунке 5.

УДК 628.74

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА В СМЕЖНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Кухарев И.А., Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Компьютерное моделирование пожаров, позволяющее прогнозировать динамику их опасных факторов, находит все более широкое применение при проектировании систем противопожар-

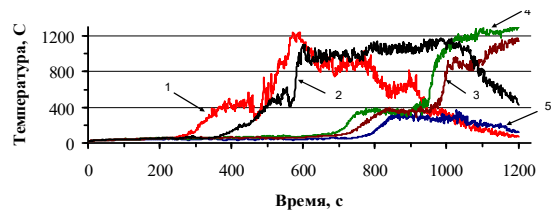


Рисунок 5 – Зависимости температуры воздуха на высоте 2.2 м в центре помещения от времени при пожаре в помещении: с проемами на месте боковых стен (1), дальней торцевой стены (2), ближней торцевой стены (3), ближней торцевой стены и двери (4), торцевых стен (5)

Достижение больших температур воздуха в случаях, показанных на рисунке 5, обусловлено распространением пламенного горения.

Выполненное моделирование пожаров позволило установить, что время достижения пожаром в помещении с естественной вентиляцией стадии, которую в литературе принято называть стадией полного охвата помещения пламенем, определяется интенсивностью возникающих при пожаре газодинамических процессов, которые, в свою очередь, определяются размерами и расположением открытых проемов.

Таким образом, результаты настоящей работы показывают, что пожары в ограждениях с естественной вентиляцией с одним и тем же количеством и расположением горючих материалов могут сильно различаться по степени опасности, определяемой возникающими газодинамическими процессами.

### Литература

1. Drysdale D. An Introduction for Fire Dynamics. Third edition. Willey, 2011. – 551 p.
2. Karlsson B., Quintiere J.G. Enclosure fire dynamics. CRC Press LLC, 2000. 317 p.
3. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, V. 1: Mathematical model, NIST Sp. Publ. 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.
4. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, NIST Special Publication 1019-5 / K. McGrattan [et al.]. Gaithersburg, MA, 2009. – 176 p.
5. Evaluating models for predicting full-scale fire behaviour of polyurethane foam using cone calorimeter data / J.U. Ezinwa [et al.] Fire Technology, 2014, V. 50. P. 693–719.

ной защиты объектов, для которых приоритетной задачей является безопасность людей. Для этого разработаны и используются различные модели пожаров – полевые, зонные, интегральные (см.,

например, [1, 2]). Полевая модель пожара является наиболее универсальной, так как не содержит никаких упрощающих предположений о структуре газодинамических потоков в расчетном пространстве, и поэтому применима для рассмотрения любых сценариев развития пожара на объектах практически любой геометрической формы. С помощью полевой модели пожара можно также определить возможность применения более простых зонных и полевых моделей к пожару, протекающему в конкретных условиях, среди которых наиболее часто встречаются случаи пожаров в смежных помещениях, т. е. в помещениях, соединенных открытыми проемами с помещением, в котором находится источник пожара.

Целью работы является исследование условий применимости зонных и интегральных моделей для моделирования пожаров в смежных помещениях на их начальном этапе до создания в помещениях условий, несовместимых с жизнью людей.

Для определения этих условий проводилось компьютерное моделирование динамики начальной стадии пожара с помощью полевой модели пожара, реализованной в программе FDS (Version 5) [2, 3]. С помощью графического интерфейса PyroSim в кубической сетке с ребром ячейки 0.1 м была создана расчетная модель помещений с общими размерами 8×5×3 м, включающая в себя два смежных помещения – две комнаты примерно одинаковой площади, соединенные открытым дверным проемом. В конструкции помещений использованы такие материалы как дерево, кирпич и бетон. В модели использовались справочные значения теплофизических параметров этих материалов.

Начальные условия моделирования: температура воздуха в комнате +20°C, давление воздуха 760 мм. рт. ст.

Моделировались первые 300 секунд стационарных по массовой скорости сгорания горючего материала пожаров с источником площадью 0.5 м<sup>2</sup> и мощностью 150 кВт, расположенного в правой комнате на полу и на высоте 1.35 м над уровнем пола.

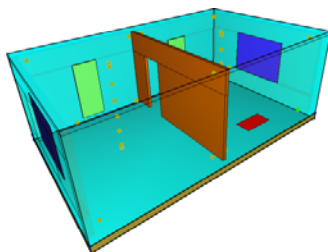


Рисунок 1 – Вид модели смежных помещений

Контроль температуры, затемнения и изменения давления воздуха осуществлялся соответствующими датчиками, расположенными на уровне 0,1 м от уровня пола и потолка, в каждом

углу и по центрам, а также в центрах комнат на высотах: 0.6, 1.1, 1.6, 2.1 м. В центре каждой комнаты на поверхности пола и потолка также были установлены датчики для контроля температуры этих поверхностей.

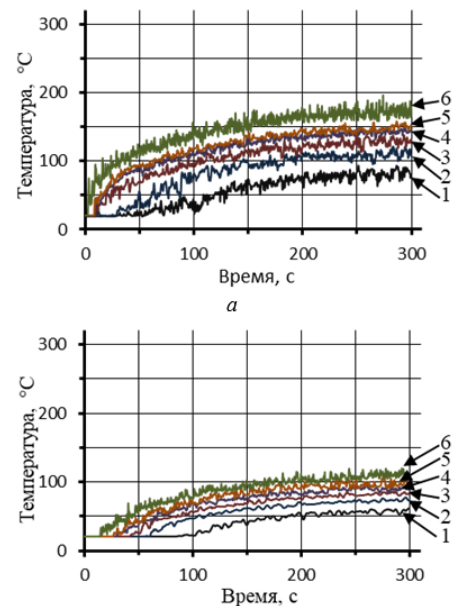


Рисунок 2 – Динамика вертикального распределения температуры воздуха в центре комнаты с источником пожара (а) и в смежной комнате (б) при пожаре с источником на полу: высота 0,1 (1), 0,6 (2), 1,1 (3), 1,6 (4), 2,1 (5) и 2,6 м (6) от уровня пола

В обоих случаях пожары были квазистационарными по тепловыделению.

Характер изменения пространственного распределения температуры воздуха по вертикали в центрах комнат с течением времени пожара показан на рисунках 2(а, б) и 3(а, б) для пожара с источником на полу и на высоте 1.35 м соответственно.

Из этих рисунков видно, что при обоих промоделированных пожарах температуры воздуха в центрах комнат на разных высотах возрастают с течением времени с насыщением, определяемым соотношением величин скоростей тепловыделения источника и тепловых потерь через стены и потолки помещений. Также видно, что в течение всех 300 с моделирования в комнате с источником пожара и в смежной комнате формируются и существуют вертикальные градиенты температуры воздуха. Так, из рисунка 2а видно, что температура воздуха в центре комнаты с источником пожара на высоте головы человека среднего роста (~ 1.6 м) в конце моделирования достигает 145 °С, что превышает критическую температуру для человека. При этом вертикальный градиент температуры в помещении составляет 100 °С. Из-за дополнительных потерь тепла температура воздуха в смежной комнате ниже, чем в комнате с источником и вертикальный градиент меньше, однако всё ещё достаточно большой.



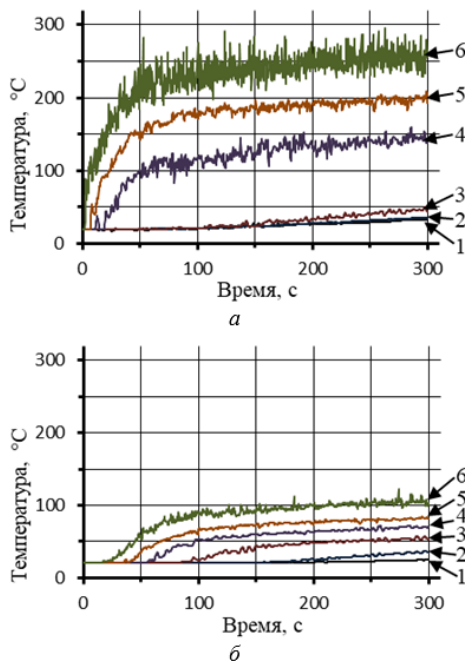


Рисунок 3 – Динамика вертикального распределения температуры воздуха в центре комнаты с источником пожара (а) и в смежной комнате (б) при пожаре с источником на высоте 1.35 м: высота 0,1 (1), 0,6 (2), 1,1 (3), 1,6 (4), 2,1 (5) и 2,6 м (6) от уровня пола

Из рисунков 2а, б и 3а, б видно, что при увеличении высоты расположения источника пожара до 1.35 м увеличиваются и абсолютные значения температур и их градиенты увеличиваются в обеих комнатах. Так, вертикальный градиент температуры в комнате с источником на конец моделирования достигает 230 °С, в смежной комнате – 75°С.

УДК 531.385

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА (ВТГ) С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Распопов В.Я.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация

Волновой твердотельный гироскоп является одним из наиболее перспективных приборов, предназначенных для определения угла и угловой скорости вращения объекта по соотношению: себестоимость изготовления/точность получаемой инерциальной информации [1, 2].

### 1. Конструкция ВТГ

В общем случае конструкция ВТГ включает в себя чувствительный элемент (резонатор), устройства возбуждения колебаний (актюаторы), устройства информации (датчики перемещений), сервисную электронику, а также корпусные, опорные и вспомогательные детали [патенты на изобретения RU 2182312, RU 2185601 и др.].

В актюаторах ВТГ могут использоваться следующие способы возбуждения колебаний: элек-

тродинамический, электромагнитный, индукционный, пьезоэлектрический и акустический. Выбор принципа возбуждения колебаний определяется, как правило, исходя из предполагаемых условий эксплуатации прибора и тактико-технических характеристик, предъявляемых к нему.

В датчиках перемещений могут применяться емкостный, пьезоэлектрический, индукционный, электромагнитный, на ПАВ принципы измерений [3, 4].

Достижение требуемых характеристик ВТГ обеспечивается, главным образом, качеством изготовления резонатора [5, 6].

### Литература

1. Drysdale D. An Introduction for Fire Dynamics. – Third edition. Willey, 2011. – 551 p.
2. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.
3. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, NIST Special Publ. 1019-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 174 p.

тродинамический, электромагнитный, индукционный, пьезоэлектрический и акустический. Выбор принципа возбуждения колебаний определяется, как правило, исходя из предполагаемых условий эксплуатации прибора и тактико-технических характеристик, предъявляемых к нему.

В датчиках перемещений могут применяться емкостный, пьезоэлектрический, индукционный, электромагнитный, на ПАВ принципы измерений [3, 4].

Достижение требуемых характеристик ВТГ обеспечивается, главным образом, качеством изготовления резонатора [5, 6].

### 2. Резонатор

**2.1. Особенности конструкции.** Известны: полусферическая, тороидальная (полуасфериче-

ская с плоским торцем) и цилиндрическая оболочечные формы резонаторов. Полусферическая и, отчасти, тороидальная формы резонаторов обладают важным свойством краевой локализации колебаний вблизи свободной кромки резонатора. Цилиндрический резонатор более прост в изготовлении, но в цилиндрической оболочке наблюдается, так называемый, вырожденный краевой эффект, который проявляется в уменьшении колебаний при удалении от свободной кромки резонатора. Ослабление этого эффекта достигается применением конструкции составного резонатора, который со стороны кромки имеет цилиндрическую часть с большой толщиной по сравнению с цилиндрической частью, которую называют подвесом, сопрягаемой с донной частью резонатора. Составной резонатор обладает повышенной чувствительностью к потерям энергии колебаний в сопряжениях с донной частью и узлом крепления к основанию (корпусу).

Переходные радиусы скруглений и пропорции между размерами креплений являются важными параметрами проектирования резонатора с позиций увеличения его добротности и уменьшения термоупругих потерь в местах конструктивных сопряжений.

Увеличению добротности резонатора служит применение узла крепления в виде монолитной, или составной ножки, расположенной с внутренней стороны данной части резонатора («гриб»), либо с наружной («бокал»). Дополнительная «развязка» резонатора от корпуса может быть выполнена симметричной системой отверстий в донной части, или круговой выточкой.

Аналогично может быть выполнена «развязка» от корпуса резонатора с внешней фланцевой (кольцевой) опорой.

**2.2. Добротность.** Добротность резонаторов, выполненных в виде тонкостенных оболочек, оказывается низкой, так как в этом случае энергия колебаний превращается в тепловую за счет переноса тепла между зонами с различной температурой. При изгибных колебаниях внешние и внутренние слои металла оболочки испытывают различные деформации: если внешние слои растягиваются, то внутренние сжимаются и наоборот. Локальная деформация материала приводит к изменению температуры. При сжатии материала локальная температура повышается, а при растяжении уменьшается. Как и деформация, эти температурные изменения будут различны для внешних и внутренних слоев материала: если в некоторый момент времени температура внешних слоев повышается, то при этом температура внутренних уменьшается и наоборот. Между областями оболочки резонатора, которые имеют разную локальную температуру, возникают тепловые потоки, которые и представляют собой потери энергии колебаний и которые приводят к

низкой добротности резонатора и, как следствие, к снижению тактико-технических характеристик ВТГ. Чтобы уменьшить интенсивность термоупругих потерь и повысить добротность резонатора можно использовать металлы с низким коэффициентом теплового расширения, либо изменить конструкцию резонатора таким образом, чтобы существенно увеличить характерную толщину колеблющейся части резонатора. Это увеличит время тепловой релаксации и сдвинет максимум термоупругих потерь в область низких частот.

**2.3. Дефекты изготовления.** Дефекты изготовления резонатора приводят к расщеплению собственной частоты его рабочих колебаний по второй форме деформации на две близкие частоты. Каждой из этих частот соответствуют колебания также по второй форме, но с определенной ориентацией волны относительно резонатора. Собственная ось резонатора, вдоль которой волна имеет наибольшую частоту, называется легкой, а ось, вдоль которой волна имеет наименьшую частоту, называется тяжелой. Такой дефект характеризуется разными значениями частот и ориентацией собственных осей и называется разночастотностью.

Скорость затухания колебаний резонатора зависит от ориентации волны, то есть резонатор имеет различные декременты затухания и соответствующее им направление осей. Такой дефект резонатора называется разнодобротностью. Устранение (уменьшение значений) этих дефектов достигается балансировкой резонатора.

**2.4. Изготовление.** Резонатор после чистовой токарной обработки геометрически представляет из себя осесимметричное цилиндрическое тело вращения. В рабочем режиме, при возбуждении волны в теле резонатора, кромка цилиндра совершает радиальные колебательные движения с амплитудой 0,002-0,004 мм (2-4 мкм). Именно изменение амплитуды колебаний в резонаторе является первичным источником информации в ВТГ. Логично, что параметры точности изготовления резонатора и шероховатость его поверхности должны быть как минимум меньше амплитуды колебаний. Для получения приборов с высокими техническими характеристиками эти параметры должны отличаться на порядки. Для обеспечения заданной в конструкторской документации (КД) геометрии и качества поверхности резонатора – станок, инструмент и режимы обработки должны соответствовать физико-механическим свойствам материала заготовки. У мартенситно-старяющихся сталей, к которым относится сплав 21НКМТ-ВИ, понижена обрабатываемость резанием (группы обрабатываемости по ISO: S, M). Это выдвигает определенные технические требования при выборе станка, подбору инструмента и режимов обработки для операции чистового точения [7].

### Заключение

Помимо технологических возможностей, потенциальный производитель ВТГ должен обладать технологической готовностью, то есть возможностью изготовления с заданными характеристиками и в отведенные сроки. Для оценки технологической готовности необходима оценка технологичности изделия, проведение конструкторского и технологического анализа КД, проведение аудита технического и организационного уровня предприятия.

Для достижения заданного качества продукции и объема выпуска предприятие должно обладать технологиями и оборудованием, обеспечивающими реализацию параметров, заложенных в КД, специалистами ИТР и высококвалифицированными рабочими.

При оценке технологической готовности предприятия необходима также оценка кооперации производства, передачи отдельных технологических операций на аутсорсинг специализированным предприятиям, обладающим необходимым оборудованием и отработанными технологиями.

### Литература

1. Волчихин И.А., Волчихин А.И., Малютин Д.М., Матвеев В.В., Распопов В.Я., Телухин С.В., Шведов А.П. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // Известия

ТулГУ. Технические науки. 2017. Выпуск 9, ч.2 – С. 59–79.

2. Линч Д. Взгляд компании «НОРТРОП ГРУММАН» на развитие инерциальных технологий / Д. Линч // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 3. – С. 102–106.

3. Матвеев, В.А., Липатников, В.И., Алевтин А.В. «Проектирование волнового твердотельного гироскопа». – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 165 с.

4. Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором / В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин. // Вестник РФФИ. Фундаментальная инженерия. 2015. – № 3 (87) – С. 84–96.

5. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. – М. : Радиотехника, 2014. – 176 с.

6. Чуманкин Е.А. Результаты проектирования и испытаний датчика угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа. // Гироскопия и навигация. 2013, № 2 (81). – С. 104–111.

7. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И. и др. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Под ред. В.Я. Распопова. – Тула : ТулГУ. 2018. – 189 с.

УДК 681.2.082

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБНЫХ БОРОВ

Киселёв М.Г., Монич С.Г., Семенкович В.П.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Зубной бор представляет собой вращающийся многолезвийный инструмент, предназначенный для обработки (препарирования) твердых тканей зубов и челюстных костей [1]. Он состоит из рабочей части (головки) 1, шейки 2 и хвостовика 3 (рисунок 1), служащего для закрепления бора в стоматологическом наконечнике.

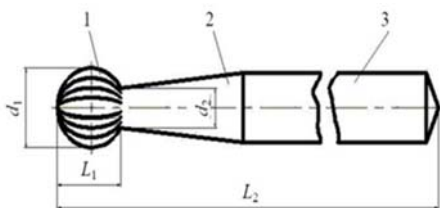


Рисунок 1 – Конструкция зубного бора:  $d_1$  – диаметр рабочей части (головки);  $d_2$  – диаметр шейки;  $L_1$  – длина рабочей части;  $L_2$  – общая длина бора

В зависимости от материала рабочей части боры разделяются на стальные, изготавливаемые целиком из высокопрочной хромированной стали ХВ5 и твердосплавные, рабочая часть которых выполняется из цилиндров твердого сплава ВК6М или ВК60М, которые привариваются к хвостовику, изготовленному из стали ШХ15 [2].

В настоящее время на территории Республики Беларусь действует стандарт ГОСТ 22090.1-93 «Инструменты стоматологические вращающиеся. Боры стальные и твердосплавные», в котором описаны основные технические требования, предъявляемые к стальным и твердосплавным стоматологическим борам. Согласно ему предъявляются требования: к материалу, применяемому при изготовлении боров; к размерам и числу лезвий; к общей длине (включая хвостовик); к радиальному биению; к прочности шейки; к твердости к рабочей части и хвостовику; к параметрам шероховатости.

При определении основных функциональных характеристик стоматологических стальных боров был рассмотрен стандарт ГОСТ 30213-94 «Инструменты стоматологические вращающиеся. Методы испытаний». В нем описаны методы измерений и испытаний описанных выше параметров, а также проверка режущей способности боров.

На рисунке 2 приведена схема проверки режущей способности цилиндрического фиссурного при проверке его.

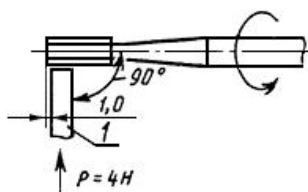


Рисунок 2 – Схема проверки режущей способности цилиндрического фиссурного стоматологического

Объектом исследования являлись стальной и твердосплавный зубной бор с цилиндрической рабочей частью (головкой), предназначенный для работы с прямым стоматологическим наконечником (рисунок 3).



Рисунок 3 – Фотография стального зубного бора, примененного в исследованиях

Исходный диаметр цилиндрической головки стального бора, на которой выполнены шесть режущих лезвий, составлял 2,53 мм при длине рабочей части 3,5 мм и общей длине бора 44 мм [3]. Твердосплавный бор диаметром рабочей части 2,08 мм также имел шесть режущих лезвий.

Для оценки режущей способности стоматологических боров была создано устройство в соответствии с требованиями ГОСТ 30213–94, схема которого и фотография его рабочей зоны приведены на рисунке 3.

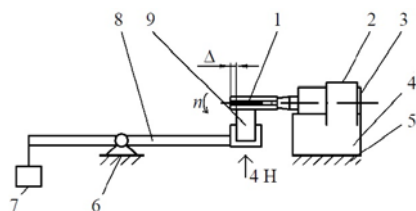


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства для определения режущей способности бора (а) и фотография его рабочей зоны (б)

Испытуемый бор 1 закрепляется в стоматологическом наконечнике 3, который с помощью хомута 2 своей цилиндрической поверхностью прижимается к поверхности призмы 4, неподвижно установленной на основании 5 устройства. На основании также закреплен кронштейн 6, в котором на опорах установлен качающийся

рычаг 8. На одном конце рычага закреплена пластина из текстолита 9 толщиной 1,5 мм, а на другом – аттестованные грузы 7, создающие усилие прижима пластины к режущей поверхности бора, равное 4 Н. Частота вращения бора контролируется с помощью лазерного тахометра testo 465 и составляет 5000 мин<sup>-1</sup>.

Предварительно при отпущенном хомуте стоматологический наконечник перемещается в призме в осевом направлении таким образом, чтобы торец бора располагался относительно поверхности текстолитовой пластины на расстоянии Δ = 1,0 мм, после чего хомут зажимается. Затем включается привод вращения стоматологического наконечника, текстолитовая пластина прижимается с заданным усилием к режущей поверхности вращающегося бора, и в этот же момент запускается секундомер. По истечении 30 с процесс обработки останавливается, текстолитовую пластину выводится из контакта с бором и переустанавливается на рычаге таким образом, чтобы на ней можно было прорезать паз другим испытуемым бором, который бы располагался относительно предыдущего на расстоянии не менее 5 мм.

Режущую способность бора оценивается по значению интенсивности резания (i):

$$i = \frac{F}{t} \quad (1)$$

где F – площадь полученного пропила на текстолитовой пластине (мм<sup>2</sup>); t = 30 с – время обработки.

Значение F находится как:

$$F = b \cdot h \quad (2)$$

где b = 1,5 мм – толщина пластины; h – полученная глубина реза на ней [4].

Величина h измеряется с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2 с точностью ±5 мкм.

### Литература

1. Тургунов, Е.М. Хирургические инструменты / Е.М. Тургунов, А.А. Нурбеков. Караганда, 2008. – 48 с.
2. Островерхов Г.Е., Бомаш Ю.М., Лубоцкий Д.Н. Оперативная хирургия и топографическая анатомия, Курск, КГМУ, 1996. – 738 с.
3. Восстановление режущей способности рабочей части стального зубного бора при помощи электроэрозионной обработки / В.П. Семенович, П.С. Богдан, М.М. Крышнев // Новые направления развития приборостроения: Материалы 10-й МНТК молодых ученых и студентов: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 146.
4. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М.Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение, 2012. – № 1. – С. 23–25.

УДК 620.179.142.6

## КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ НАМАГНИЧЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДОРАБОТАННЫМИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ МТНП-1

Шарандо В.И.<sup>1</sup>, Кременькова Н.В.<sup>1</sup>, Чернышев А.В.<sup>1</sup>, Булатов О.В.<sup>1</sup>,  
Калошин В.А.<sup>2</sup>, Кинжагулов И.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь  
<sup>2</sup>АО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», Химки, Российская Федерация

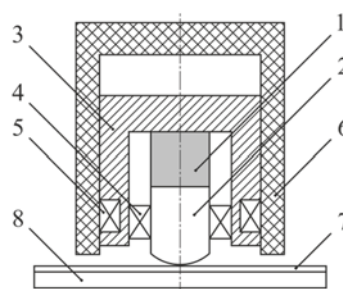
<sup>3</sup>Университет ИТМО, С.-Петербург, Российская Федерация

В рамках программы Союзного государства «Космос-НТ» (сроки выполнения 2008-2011 гг.) создан в Республике Беларусь и сертифицирован в Российской Федерации (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений РФ под № 44898-10) новый тип магнитодинамических толщиномеров – приборы МТНП-1 [1], предназначенные для неразрушающего контроля никелевых покрытий камер сгорания жидкостных ракетных двигателей (КС ЖРД). Четыре толщиномера МТНП-1 внедрены на Воронежском механическом заводе, два аналогичных прибора – на предприятии «Металлист-Самара». В настоящее время с помощью указанных приборов контролируют толщину никелевого покрытия в технологическом цикле изготовления КС ЖРД.

Результаты исследовательских испытаний приборов МТНП-1, полученные в производственных условиях, позволили установить, что в отдельных случаях имеет место снижение точности измерений вышеуказанной толщины, обусловленное остаточной намагниченностью покрытия. Установлено, что основной причиной этой намагниченности являются технологические особенности изготовления КС ЖРД. Самым надежным решением данной проблемы является устранение всех выявленных пятен остаточной намагниченности на поверхности покрытия с помощью полой многovitковой катушки, питаемой от сети переменного тока. Однако для этого необходимо добавить в методику контроля толщины покрытия две операции: выявление пятен остаточной намагниченности с помощью измерителя магнитных полей (намагниченности) ИМП-1 [1] или аналогичного прибора и размагничивание пятен катушкой. Так как указанное решение оказалось неприемлемым для практики, было предложено доработать конструкцию толщиномера МТНП-1, оснастив его встроенной системой размагничивания покрытий. В состав этой системы входят конденсаторы достаточно большой емкости, и дополнительная многovitковая катушка, расположенная в магнитодинамическом преобразователе (рисунок 1). Питание размагничивающей системы осуществляется от батареек или аккумуляторов, установленных в электронном блоке.

Работа размагничивающей системы состоит в том, что в процессе каждого измерения после установки преобразователя на поверхность никелевого покрытия КС ЖРД происходит разряд

конденсаторов, приводящий к поочередному возникновению в витках размагничивающей катушки двух импульсов тока разной полярности, которые генерируют поле, устраняющее пятно остаточной намагниченности, расположенное на поверхности покрытия. Параметры импульсного размагничивающего поля выбраны таким образом, чтобы устранять пятна даже в том случае, когда индукция остаточного поля над поверхностью покрытия достигает 5 мТл [2]. Применение противоположно направленных импульсов гарантирует устранение любого пятна независимо от направления нормальной составляющей вектора индукции указанного поля.



1 – постоянный магнит; 2 – стальной наконечник;  
3 – стальной корпус; 4 – измерительная катушка;  
5 – размагничивающая катушка; 6 – эбонитовый корпус; 7 – покрытие; 8 – основание

Рисунок 1 – Схема преобразователя доработанного магнитодинамического толщиномера МТНП-1

Разработка размагничивающей системы, оптимизация ее параметров, изготовление и лабораторные испытания оснащенного ею доработанного магнитодинамического толщиномера МТНП-1 выполнены по заданию программы Союзного государства «Мониторинг-СТ» (2013–2017 гг.). Внешний вид указанного прибора приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Доработанный магнитодинамический толщиномер МТНП-1, оснащенный размагничивающей системой

Таблица – Результаты измерений толщины никелевого покрытия в различном магнитном состоянии

| Номер сечения | Номер точки в сечении | Исходная намагниченность |                   | Намагничено со знаком + |                   | Намагничено со знаком – |                   |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
|               |                       | Остаточная индукц., мТл  | Ср. показан., мкм | Остаточная индукц., мТл | Ср. показан., мкм | Остаточная индукц., мТл | Ср. показан., мкм |
| I             | 1                     | -0,18                    | 243               | 3,27                    | 243               | -2,67                   | 242               |
|               | 2                     | -0,15                    | 222               | 2,14                    | 221               | -2,56                   | 221               |
|               | 3                     | 0,23                     | 215               | 2,59                    | 216               | -3,48                   | 215               |
|               | 4                     | 0,24                     | 234               | 3,21                    | 232               | -3,01                   | 232               |
| II            | 1                     | -0,19                    | 238               | 2,78                    | 238               | -3,28                   | 237               |
|               | 2                     | 0,27                     | 229               | 2,71                    | 230               | -2,94                   | 229               |
|               | 3                     | -0,16                    | 222               | 2,29                    | 222               | -1,99                   | 220               |
|               | 4                     | 0,14                     | 236               | 2,16                    | 237               | -2,31                   | 234               |
| III           | 1                     | 0,27                     | 235               | 3,17                    | 236               | -3,03                   | 233               |
|               | 2                     | 0,21                     | 245               | 3,35                    | 245               | -2,79                   | 244               |
|               | 3                     | 0,11                     | 233               | 3,24                    | 235               | -2,48                   | 232               |
|               | 4                     | 0,18                     | 221               | 2,64                    | 221               | -3,25                   | 220               |

Исследовательские испытания доработанного прибора МТНП-1 проведены в Университете ИТМО (г. С.-Петербург) на натурной части КС ЖРД. Цель испытаний – оценка эффективности размагничивающей системы. Остаточная намагниченность никелевого покрытия характеризовалась исходным состоянием КС ЖРД либо создавалась с помощью приставного цилиндрического магнита из неодим-железо-бора, при этом знак намагниченности (+ или –) определялся полюсом, которым магнит был приставлен к покрытию. Измерения выполнены в трех контрольных сечениях, расположение и номера которых показаны на рисунке 3.

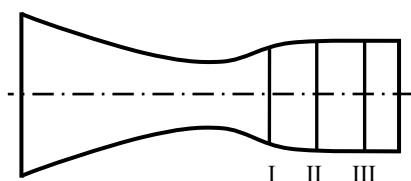


Рисунок 3 – Расположение сечений КС ЖРД при измерении толщины никелевого покрытия

В каждом сечении камеры сгорания измерения выполнены в четырех точках, расположенных по окружности сечения. Полученные данные приве-

дены в таблице, из которой следует, что при условии применения размагничивающей системы остаточная намагниченность никелевого покрытия КС ЖРД практически не влияет на результаты измерений его толщины. Это подтверждает возможность использования доработанных толщиномеров МТНП-1 для контроля изделий, выпускаемых авиа-космическими предприятиями.

#### Литература

1. Приборы неразрушающего контроля, разработанные в ИПФ НАН Беларуси [Электронный ресурс]: официальный сайт ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси». – Режим доступа: <http://iph.bas-net.by/VDev/index.html>.
2. Лухвич, А.А. Влияние остаточной намагниченности на результаты контроля магнитодинамическими толщиномерами специальных покрытий камер сгорания жидкостных ракетных двигателей / А.А. Лухвич, О.В. Булатов, А.Л. Лукьянов // Шестой белорусский космический конгресс, Минск, 28-30 октября 2014 г. : материалы: в 2-х т. / Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. – Минск, 2014. – Т. 1. – С. 58–61.

УДК 620.179.142.6

### КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ НАМАГНИЧЕННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДОРАБОТАННЫМИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ МТДП-1

Шарандо В.И.<sup>1</sup>, Кремьenkova Н.В.<sup>1</sup>, Лукьянов А.Л.<sup>1</sup>, Чернышев А.В.<sup>1</sup>, Булатов О.В.<sup>1</sup>, Калошин В.А.<sup>2</sup>, Кинжагулов И.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>АО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», Химки, Московская область, Российская Федерация

<sup>3</sup>Университет ИТМО, С.-Петербург, Российская Федерация

Слой хрома, нанесенный на никелевое покрытие камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (КС ЖРД), обеспечивает ей дополнительную защиту от прогорания. По заданию программы Союзного государства «Космос-НТ» (2008-2011 гг.) в Республике Беларусь созданы

магнитодинамические приборы МТДП-1 для неразрушающего контроля толщины таких двухслойных покрытий [1]. В 2012 году этот тип приборов был сертифицирован в Российской Федерации (внесен в Госреестр РФ под № 50930-12). Однако при проведении исследо-

вательских производственных испытаний указанного прибора была выявлена существенная зависимость его показаний, полученных при измерении толщины слоя хрома, от остаточной намагниченности никелевого покрытия, в первую очередь обусловленной технологией изготовления КС ЖРД. Результаты исследований показали, что индукция остаточного магнитного поля над поверхностью никелевого покрытия определяется в основном нормальной составляющей индукции поля, создаваемого постоянным цилиндрическим магнитом преобразователя магнитодинамического толщиномера, и может достигать  $\pm 5$  мТл. Так как постоянный магнит, установленный в преобразователе, предназначенном для измерения толщины слоя хрома, создает относительно слабое поле, остаточная намагниченность никелевого покрытия, расположенного под слоем хрома, приводит к

дополнительной погрешности, которая в некоторых случаях может достигать десятков процентов [2].

В рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» (2013–2017 гг.) создан доработанный магнитодинамический толщиномер МТДП-1, оснащенный встроенной размагничивающей системой, принцип действия которой изложен в работе «Контроль толщины намагниченных никелевых покрытий доработанными магнитодинамическими приборами МТНП-1», опубликованной в настоящем сборнике. Так как прибор МТДП-1 комплектуется двумя съемными преобразователями, один из которых предназначен для измерения толщины слоя хрома, а другой – слоя никеля, размагничивающая катушка входит в состав каждого из этих преобразователей. Внешний вид такого прибора приведен на рисунке 1.

Таблица 1 – Результаты измерений толщины слоя хрома на слое никеля, полученные при различных магнитных состояниях никеля

| Номер сечения | Номер точки в сечении | Исходная намагниченность слоя никеля КС ЖРД |                   | Слой никеля намагничен приставным магнитом |                   |                         |                   |
|---------------|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
|               |                       | Остаточная индукц., мТл                     | Ср. показан., мкм | со знаком +                                |                   | со знаком –             |                   |
|               |                       |                                             |                   | Остаточная индукц., мТл                    | Ср. показан., мкм | Остаточная индукц., мТл | Ср. показан., мкм |
| IV            | 1                     | 0,29                                        | 135               | 2,95                                       | 136               | -2,79                   | 134               |
|               | 2                     | 0,38                                        | 123               | 4,79                                       | 123               | -4,58                   | 122               |
|               | 3                     | -0,27                                       | 132               | 3,54                                       | 132               | -3,73                   | 130               |
|               | 4                     | 0,49                                        | 127               | 2,98                                       | 127               | -2,56                   | 126               |
| V             | 1                     | 0,18                                        | 139               | 2,37                                       | 139               | -2,69                   | 139               |
|               | 2                     | 0,69                                        | 129               | 3,33                                       | 128               | -3,58                   | 127               |
|               | 3                     | 0,39                                        | 133               | 3,12                                       | 132               | -3,42                   | 132               |
|               | 4                     | 0,17                                        | 149               | 2,97                                       | 148               | -3,24                   | 149               |
| VI            | 1                     | 0,22                                        | 131               | 3,85                                       | 132               | -3,27                   | 130               |
|               | 2                     | -0,19                                       | 133               | 4,72                                       | 133               | -4,51                   | 133               |
|               | 3                     | -0,20                                       | 140               | 4,11                                       | 141               | -3,95                   | 140               |
|               | 4                     | 0,17                                        | 126               | 3,98                                       | 127               | -3,51                   | 126               |

Таблица 2 – Результаты измерений толщины слоя никеля под слоем хрома, полученные при различных магнитных состояниях никеля

| Номер сечения | Номер точки в сечении | Исходная намагниченность слоя никеля КС ЖРД |                   | Слой никеля намагничен приставным магнитом |                   |                         |                   |
|---------------|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
|               |                       | Остаточная индукц., мТл                     | Ср. показан., мкм | со знаком +                                |                   | со знаком –             |                   |
|               |                       |                                             |                   | Остаточная индукц., мТл                    | Ср. показан., мкм | Остаточная индукц., мТл | Ср. показан., мкм |
| IV            | 1                     | 0,11                                        | 371               | 2,15                                       | 374               | -3,43                   | 371               |
|               | 2                     | 0,21                                        | 425               | 4,44                                       | 426               | -4,37                   | 424               |
|               | 3                     | -0,17                                       | 362               | 3,24                                       | 366               | -3,53                   | 362               |
|               | 4                     | 0,34                                        | 366               | 3,72                                       | 367               | -3,54                   | 363               |
| V             | 1                     | -0,12                                       | 350               | 3,31                                       | 350               | -2,39                   | 349               |
|               | 2                     | 0,37                                        | 359               | 4,23                                       | 360               | -4,36                   | 358               |
|               | 3                     | 0,26                                        | 362               | 3,02                                       | 364               | -3,12                   | 362               |
|               | 4                     | -0,13                                       | 340               | 1,99                                       | 342               | -2,94                   | 340               |
| VI            | 1                     | 0,17                                        | 386               | 2,95                                       | 386               | -2,87                   | 384               |
|               | 2                     | 0,19                                        | 403               | 3,97                                       | 405               | -3,81                   | 402               |
|               | 3                     | -0,31                                       | 394               | 3,71                                       | 395               | -4,05                   | 393               |
|               | 4                     | 0,24                                        | 388               | 4,12                                       | 388               | -3,74                   | 386               |

Для оценки эффективности эксплуатации в условиях производства доработанный магнитодинамический толщиномер МТДП-1, показанный на рисунке 1, был испытан в Университете ИТМО на натурной части КС ЖРД, имеющей двухслойное хромоникелевое покрытие в области ее критического сечения. Измерения толщин хрома и никеля выполнены в трех контрольных сечениях, расположение и номера которых приведены на рисунке 2.



- 1 – преобразователь для измерения толщины хрома, нанесенного на никелевое покрытие;
- 2 – преобразователь для измерения толщины никеля, расположенного под слоем хрома

Рисунок 1 – Доработанный магнитодинамический толщиномер МТДП-1, оснащенный размагничивающей системой

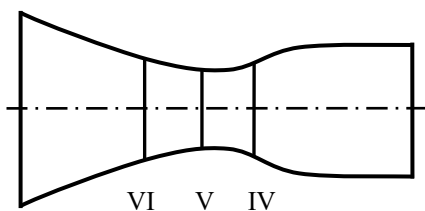


Рисунок 2 – Расположение сечений КС ЖРД при измерении толщины двухслойного хромоникелевого покрытия

Как и при проведении исследовательских испытаний доработанного магнитодинамического толщиномера МТДП-1, остаточная индукция была определена измерителем магнитных полей ИМП-1 [1]. Толщины слоев хрома и никеля при разных условиях создания намагниченности (в исходном состоянии КС ЖРД, а также после намагничивания слоя никеля приставным постоянным магнитом со знаком + или -) измерены по методике, реализованной в ходе указанных испытаний.

Приведенные в таблицах 1 и 2 данные свидетельствуют о том, что остаточная намагниченность никеля не оказывает влияния на результаты измерений толщин слоев хрома и никеля. Это подтверждает эффективность размагничивающей системы, встроенной в доработанный магнитодинамический толщиномер МТДП-1.

### Литература

1. Приборы неразрушающего контроля, разработанные в ИПФ НАН Беларуси [Электронный ресурс]: официальный сайт государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси». – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/VDev/index.html>. – Дата доступа: 19.06.2018.

2. Лухвич, А.А. Влияние остаточной намагниченности на результаты контроля магнитодинамическими толщиномерами специальных покрытий камер сгорания жидкостных ракетных двигателей / А.А. Лухвич, О.В. Булатов, А.Л. Лукьянов // Шестой белорусский космический конгресс, Минск, 28-30 окт. 2014 г. : материалы: в 2-х т. / Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. – Минск, 2014. – Т. 1. – С. 58–61.

УДК 621.06

## УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ОСТРОТЫ РЕЖУЩИХ КРОМОК МЕДИЦИНСКИХ СКАЛЬПЕЛЕЙ

Киселев М.Г., Мониц С.Г., Яхимович П.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Скальпель или хирургический нож – медицинский инструмент, предназначенный для рассечения мягких тканей. В зависимости от конструкции и назначения выделяют множество видов скальпелей [2].

Медицинский скальпель состоит из таких компонентов как:

1. Режущая часть, которая состоит из режущей кромки, собственно лезвия, окончания (острого, закругленного).
2. Рукоятка. Может быть разных размеров, из различных материалов, начиная от металлических сплавов и заканчивая пластмассой.
3. Шейка.
4. Обушка.



Рисунок 1 – Примеры выполнения хирургических ножей



В зависимости от того, какого рода надрез в какой части тела необходимо сделать хирургу, скальпели могут подразделяться на такие виды, как:

1. Остроконечные.
2. Брюшные.
3. Полостные.
4. Ампутационные.

Лезвия, что являются основным компонентом хирургического ножа, могут иметь разнообразие параметров, что определяет вид скальпеля:

1. Стандартный.
2. Стандартный анатомический.
3. Специальный хирургический.
4. Деликатный.
5. Микрохирургический.



Рисунок 2 – Разновидности лезвий скальпелей

Большое многообразие видов скальпелей, а также крайне высокие требования к качеству изготовления привели к появлению большого числа методик, по которым производят оценку данных медицинских инструментов.

Согласно ГОСТ 21240 «Скальпели и ножи медицинские. Общие технические требования и методы испытаний» существует ряд контролируемых параметров, необходимых для осуществления наиболее полной оценки рассматриваемых медицинских инструментов. Однако проанализировав записи ГОСТ можно сделать вывод, что некоторые из приведенных в нем методик нуждаются в доработке.

Так проверка остроты режущих кромок производится следующим образом: путем разрезания испытуемым инструментом дубленой перчаточной кожи по ГОСТ 15092 толщиной от 0,4 мм до 0,7 мм, натянутой на барабан. Разрез должен быть ровным, без рваных краев. После разрезания трещины и выкрошенные места на режущей кромке лезвия не допустимы. Ширину режущей кромки измеряют на инструментальном микроскопе БМИ-1 или БМИ-1Ц по ГОСТ 8074 с увеличением 30-50<sup>x</sup> [1].

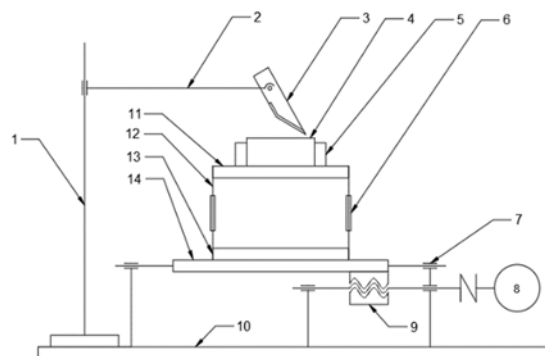
Существующий метод контроля остроты режущих кромок медицинских скальпелей является субъективным, что не позволяет давать необходимую оценку остроты режущих кромок инструмента достаточно корректно.

Для получения количественных данных, необходимых для осуществления оценки режущей

способности инструмента нами предложен способ, при котором возможно получение эмпирическим методом недостающих данных для последующей проработки существующих методик контроля параметров медицинских скальпелей.

Предлагаемый способ позволяет при помощи тензометрии провести измерения необходимых параметров, таких как усилие резания и усилие прокола испытательного материала в различных условиях, таких как угол и скорость резания. Также установка позволяет использовать для проведения испытаний различные типы материалов, что способствует накоплению большого числа эмпирических данных, необходимых для дальнейшей проработки методик испытаний медицинских скальпелей.

Конструктивно установка выполнена следующим образом (Рисунок 3):



1 – стойка, 2 – рычаг, 3 – испытуемый инструмент (скальпель), 4 – испытательный материал (дубленая перчаточная кожа), 5 – приспособление с продольным пазом, 6 – тензодатчики, 7 – направляющие, 8 – электродвигатель со встроенным редуктором, 9 – ходовой винт, 10 – основание, 11 – установочная плита, 12 – упругие стальные пластины, 13 – кронштейн, 14 – каретка

Рисунок 3 – устройство для проверки остроты режущих кромок медицинских скальпелей

На массивном основании 10 смонтированы направляющие 7, на подвижной части которой закреплена каретка 14. Последняя получает поступательные движения в горизонтальном направлении от электродвигателя с встроенным редуктором 8. Вращение его вала через муфту передается ходовому винту 9 и преобразуется передачей «винт-гайка» в поступательное движение каретки 14. Для регулировки частоты вращения вала электродвигателя, а соответственно скорости перемещения каретки, его питание осуществляется с помощью частотного преобразователя.

На каретке 14 смонтированы упругие направляющие 12 в виде двух стальных (У8А) пластин, которые в нижней части прикреплены к передвижному кронштейну 13, а в верхней – к установочной плите 11. На ней закрепляется приспособление с продольным пазом 5 для закрепления образца материала. Испытуемый ин-

струмент 3 закрепляется на торце рычага 2, который установлен на стойке 1, жестко связанной с основанием установки 10. На указанных элементах предусмотрены устройства (фиксаторы) для осуществления необходимых перемещений инструмента перед проведением испытаний. При включении электродвигателя 8 происходит перемещение образца разрезаемого материала 4 по направлению к лезвию инструмента 3. Возникающее в процессе резания усилие приводит к деформации стальных пластин 12, на поверхности которых наклеены тензодатчики 6, включенные в полумостовую схему. Сигнал от тен-

зодатчиков, пропорциональный силе резания, поступает на усилитель и далее на цифровой осциллограф.

#### Литература

1. ГОСТ 21240-89 «Скальпели и ножи медицинские. Общие технические требования и методы испытаний».
2. Сабитов В.Х. Медицинские инструменты. М.: Медицина, 1985. – 175 с.
3. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 5-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 332 с.

УДК 621.397 (075.)

### ТИПОВЫЕ ОШИБКИ ВЫПОЛНЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОХРАННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Воробей Р.И., Тьяловский К.Л., Мартинкевич А.В., Стефурак С.А., Кошель Е.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Современные средства систем охранного телевидения (СОТ) позволяют визуально контролировать объект в различных условиях: при разном уровне освещенности объекта, в том числе в полной темноте (для зрения человека); на различном расстоянии; скрытно; автоматически обнаруживать перемещение на защищаемом объекте и многое другое. Причем, из-за возможности регистрации и анализа не только события преступления или чрезвычайного происшествия, но также событий до и после него, применение СОТ способствует раскрытию преступлений или расследованию причин чрезвычайных происшествий, а в ряде случаев и их предупреждению. Системы охранного телевидения совместно с системами пожарной и охранной сигнализации, системами контроля управления доступом образуют интегрированные высокоэффективные комплексы обеспечения безопасности объектов, персонала и посетителей [1]. Таким образом отрасль охранного телевидения имеет непосредственное отношение к безопасности государства и общества.

Охранное видеонаблюдение чаще всего не предотвращает совершение фиксируемых им правонарушений; но оно эффективно решает розыскные задачи, когда на основе анализа архива можно понять, что происходило в тот или иной момент на охраняемом объекте. Систему видеонаблюдения можно рассматривать как эффективный способ раннего выявления угроз при помощи обнаружения людей, объектов, их перемещений в поле зрения камер наблюдения.

Несмотря на внешнюю простоту работы системы охранного телевидения, эффективное проектирование СОТ невозможно без знания основных принципов их построения и функционирования [2, 3]. Непрофессионалу сложно вы-

брать оптимальное решение для организации видеонаблюдения, которое бы эффективно решало те проблемы в обеспечении безопасности, для устранения которых планируется внедрение системы охранного телевидения.

Во время обучения основам проектирования систем обеспечения безопасности проектировщик совершает ряд ошибок, причем многие из них характерны практически для всех обучающихся и составляют определенный набор типовых ошибок проектирования. Появление таких ошибок и их состав обусловлены как субъективными, так и объективными факторами. Причем, в реальных системах эти факторы могут играть как отрицательную, так и положительную роль. При начале работы над учебным проектом СОТ обучающемуся необходимо уяснить место СОТ в общей системе обеспечения безопасности [1-3] и основные особенности проектирования и применения СОТ [4].

Отличительными особенностями СОТ, игнорирование которых и приводит к генерации ряда типовых ошибок при разработке учебного проекта (к сожалению, и некоторых реальных проектов), являются:

1. Неверное определение цели и задач проектируемой системы охранного телевидения;
2. Противоречие между задачами СОТ и правовыми нормами;
3. Наличие в системе охранного телевидения человека;
4. Информационная избыточность каждого из изображений и всей совокупности изображений;
5. Отсутствие международных и региональных стандартов определения основных параметров как элементов СОТ, так и системы в целом;

6. Отсутствие или неполнота учета факторов риска, характерных именно при формировании образов изображения зон наблюдения;

7. Многообразие способов и средств формирования видеосигналов.

Этот перечень можно и продолжить, но целесообразно остановиться на приведенных факторах. Целью СОТ является не получение набора качественных изображений в зонах наблюдения, а формирование сигнала тревоги при возникновении чрезвычайной ситуации на объекте охраны, фиксация соответствующих изображений с возможностью их просмотра и идентификации предметов, объектов, действий, обеспечивающих расследование причин и развития чрезвычайных ситуаций. Средства СОТ должны обеспечивать верификацию сигналов тревоги извещателей систем охранной и пожарной сигнализации. При этом субъективное качество «картинки» правильно спроектированной СОТ может уступать параметрам изображений СОТ с ошибками. Отметим, что при определении задач СОТ вынужденно используют не четкие безвариантные методы расчета, а рекомендации, например, Британского МВД.

Законодательство различных стран в области обеспечения «личного пространства человека (право на собственное изображение)» вступает в противоречие при использовании видеоизображений в целях обеспечения безопасности.

Для анализа многих изображений СОТ, часто с неявно поставленными целями выявления различных ситуаций, система охранного телевидения предполагает участие человека (оператора), который, однако не может качественно анализировать более 7-8 изображений и делает ошибки даже в начале дежурства. Невозможно сформулировать технические требования к оператору СОТ (какого именно роста или веса нарушителей он обязан обнаруживать, на каком расстоянии уметь их различать и т. п.); также невозможно проверить выполнение указанных требований, моделируя ситуацию на объекте, поскольку на решение оператора в конкретный момент оказывает влияние большое число трудно учитываемых факторов. Включение в систему человека делает невозможным четкое описание характеристик и возможностей СОТ.

Информационная избыточность изображений, обрабатываемых СОТ, связана с самой природой изображения и возрастает с увеличением разрешения используемых видеокамер. С одной стороны, это затрудняет выявление чрезвычайных ситуаций с использованием строгих алгоритмов, с другой – позволяет обнаруживать их и для ранее не встречавшейся совокупности факторов и событий. Это же обуславливает и необходимость присутствия человека в составе системы. Однако необходимость учета

кажущихся несущественными факторами также приводит к ошибкам на ранних стадиях обучения проектированию СОТ.

Отсутствие международных и региональных стандартов определения основных параметров как элементов СОТ, так и системы в целом, связано с наличием противоречивых ведомственных и корпоративных интересов [2-4]. Отсутствие согласованной позиции многих заинтересованных сторон приводит к различным определениям таких важных параметров технических средств СОТ, как чувствительность, разрешающая способность изображения, пропускная способность канала связи, требуемая емкость регистратора и т.д. [5]. Причем различия в определениях некоторых параметров достигают существенных величин: даже не десятки, а сотен процентов. Это делает невозможным сравнение технических характеристик СОТ без учета методик, которыми они определялись. Естественно, начинающий проектировщик может запутаться в многочисленных системах и методиках оценки качества СОТ и принять неверное решение при выборе технических средств СОТ. Часто происходит идеализация технических возможностей. Этому способствует формирование почти идеальной «картинки» при компьютерном моделировании. Так, применение транс фокаторов и длиннофокусных объективов в расчетах и при моделировании дает хорошее качество изображения и достаточное число пикселей на элемент объекта наблюдения для решения задач видеонаблюдения. Например, для длиннофокусного объектива при удалении на 200 м можно получить поле зрения около 2-3 м. Хорошо, но при этом угол зрения составляет единицы – доли градуса, и дрожание камеры, например, при изменении ветровой нагрузки на кожух, может вызвать изменение изображения в десятках-сотнях пикселей. А это уже приведет либо к размытию объекта, либо к слиянию его с фоном (исчезновению). Кроме того, длиннофокусный объектив всегда имеет небольшую глубину резкости.

В ряде СОТ используются устройства формирования изображения с различными по свойствам матрицами, использующими различные диапазоны длин волн излучения: ИК-видеокамеры, тепловизоры, «видеокамеры» терагерцового Т-диапазона. Характер изображений, формируемых в разных диапазонах длин волн излучения имеет совершенно различный характер.

Процесс проектирования СОТ имеет итерационный характер, с последовательным уточнением состава системы и параметров ее элементов, возвращением к уже выполненным этапам с целью их корректировки. На начальных стадиях обучению проектированию СОТ важное значение имеет выявление и осознанное, с анализом причин их возникновения, устранение типовых

ошибок проектирования СОТ. Для этого необходимо учитывать, как отличия СОТ от других систем обеспечения безопасности, так и особенности в проектировании СОТ конкретных объектов охраны.

#### Литература

1. Гарсиа, М. Проектирование и оценка систем физической защиты. – М.: Мир, 2002. – 386 с
2. Груба, И.И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 220 с.

3. Гвоздек Михаэль. Справочник по технике для видеонаблюдения. Планирование, проектирование, монтаж – Техносфера, 2010. – 552 с.

4. Тявловский К.Л., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Тявловский А.К., Свистун А.И. Проектирование систем охранного телевидения: учебно-методическое пособие. – Минск: БНТУ, 2016. – 69 с.

5. Брель, И.Д. Пути и методы нормативного регулирования СОТ. // Технологии безопасности, 2013, № 1. – С. 11–15.

УДК 628.74

### ЛИНЕАЛИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРЫ ЗАДЫМЛЕННОЙ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Антошин А.А., Олефир Г.И., Безлюдов А.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Методы контроля оптической плотности задымленной среды положены в основу функционирования пожарных извещателей (линейных), а также приборов, контролирующих условия при проведении испытаний всех типов дымовых пожарных извещателей. Такие приборы должны обеспечивать выполнение требований, методик проведения испытаний на чувствительность к тестовым пожарам и порогу срабатывания. Погрешность измерений согласно этим требованиям не должна превышать 5 % [1, 2]. В огневых испытаниях, воспроизводящих условия близкие к реальному пожару, выполнение этого требования затруднительно. Турбулентные потоки газовой среды, неравномерность пространственного распределения продуктов горения, характерные для реального горения, являются причинами больших флуктуаций измеряемых величин потоков оптического излучения, распространяющегося в задымленной среде. Мгновенные значения детектируемых сигналов могут отличаться очень сильно в связи с дискретностью измерений.

В основу работы оптико-электронных дымовых пожарных извещателей положен принцип измерения потока оптического излучения, рассеянного на частицах дыма. Однако большинство авторов пропускание [2, 3] и рассеивающую способность задымленных сред [4, 5] рассматривают в отдельности. Детальное совместное изучение этих процессов не проводилось.

Поиск новых методов исследований, совершенствование существующих приборов и решение прикладных задач требуют разработки методов обработки сигналов как экспериментальных установок, так и средств измерения испытательного оборудования.

Измерение интенсивностей прошедшего и рассеянного вперед электромагнитного излучения оптического диапазона осуществлялось раз-

работанным оптико-электронным измерительным устройством в газовой среде установки «Дымовой канал» [6], предназначенной для моделирования начальной стадии пожаров в помещении. Структурная схема разработанного устройства представлена на рисунке 1. В качестве приемников оптического излучения применены кремниевые фотодиоды. Схемы согласования из двух последовательно включённых операционных усилителей типа Rail-to-rail обеспечивают преобразование, усиление и согласование с АЦП выходного сигнала фотодиода (фототока). Ошибка преобразования 12-тиразрядным АЦП составляет  $9 \times 10^{-4}$ В. Микроконтроллер STM32F103C8T6 выполняет функции управления, выборки значений из АЦП, привязку их ко времени, передачу информации на персональный компьютер.

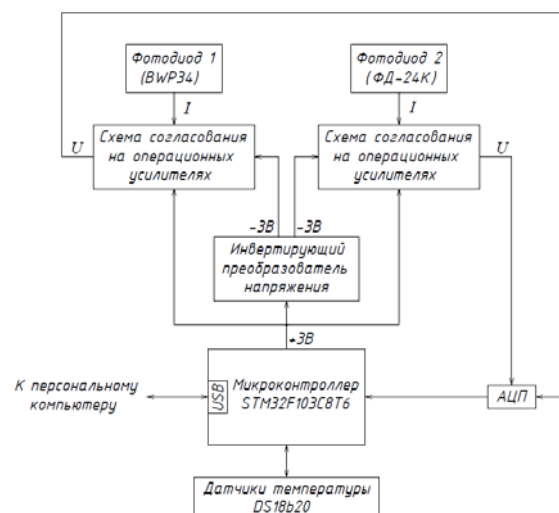


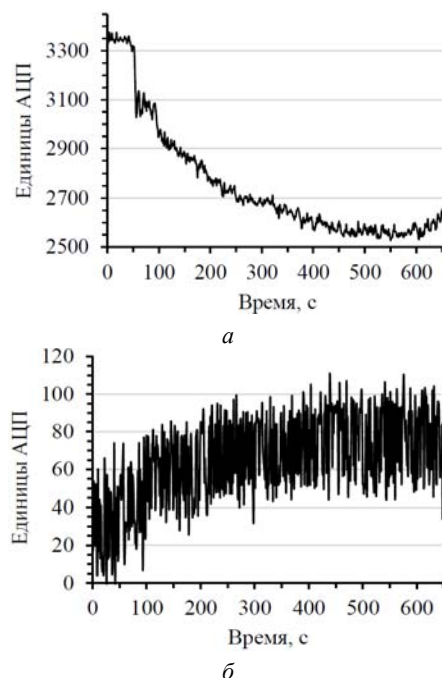
Рисунок 1 – Структурная схема измерительного устройства

Оптическая система установки «Дымовой канал» состоит из источника излучения (свето-

диода), узла, преобразующего его излучение в узкий параллельный световой пучок, собирающей линзы и двух фотодиодов. Один фотодиод регистрирует оптическое излучение, прошедшее через задымленную среду и рассеянное менее чем на  $11^\circ$ . Второй фотоприемник регистрирует излучение, рассеянное частицами дыма на угол более  $11^\circ$  и менее  $15^\circ$ .

В качестве горючего для образования дыма использовались хлопчатобумажные фитили, деревянные бруски мебельный поролон, а также методом наименьших квадратов (ПЛИМНК). Введены эксперименты с присутствием в газозвдушной среде водяного пара.

Известно, что неравномерность пространственного распределения продуктов горения при образовании турбулентных потоков является причиной сильного разброса результатов измерений оптических свойств газозвдушной среды. На рисунке 2 представлены сигналы, полученные в эксперименте с тлением деревянных брусков.



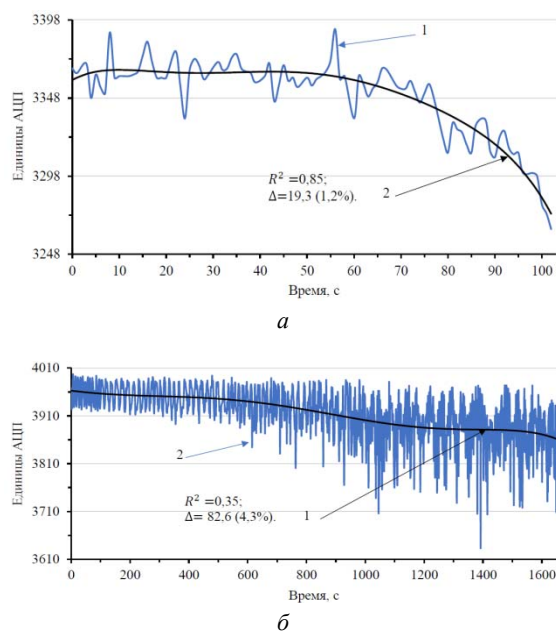
а) измеряется поток излучения, прошедший через среду; б) измеряется поток излучения, рассеянный частицами дыма

Рисунок 2 – Зависимости от времени горения топлива величины выходного сигнала АЦП измерительного устройства (тление деревянных брусков)

Большой разброс данных, близкий к 100 % для рассеянного излучения и сохраняющийся в абсолютных значениях для прошедшего излучения, обуславливает необходимость их усреднения для устранения неопределённости измерений.

Лучших результатов обработки полученных сигналов удалось достичь применением поли-

номиальной линеаризации работе также опробованы и дана оценка результатам обработки сигналов методами скользящего среднего и весовой функции. ПЛИМНК обладает несомненным преимуществом, заключающимся в лучших показателях точности сигнала, получаемого в результате обработки, при сравнимой сложности реализации, а также возможности получения аналитической функции сигнала. Результаты обработки ПЛИМНК исходных сигналов, характеризующихся наибольшим разбросом, представлены на рисунке 3. В проведённых экспериментах наибольший разброс данных при задымлении среды по каналу фотодиода, регистрирующего прошедшее излучение, имел место при тлении хлопчатобумажных фитилей; а любой набор данных из экспериментов с паром имел больший разброс по сравнению с любым набором из экспериментов с дымом.



а) эксперимент с тлением хлопчатобумажных фитилей; б) эксперимент с водяным паром

Рисунок 3 – ПЛИМНК экспериментального сигнала с фотодиода, регистрирующего прошедшее излучение: 1 – сигнал до обработки; 2 – кривая, полученная в результате линеаризации

В качестве показателей оценки достоверности и точности обработки применены индекс детерминации ( $R^2$ ) и оценка доверительного интервала ( $\Delta$ ). В результате обработки всего набора экспериментальных данных установлено, что применение ПЛИМНК обеспечивает погрешность обработки сигнала фотодиода, регистрирующего прошедшее излучение, не более 1,2 % на интервале удельной оптической плотности среды от 0 до 0,2 дБ/м для дыма и не более 4,3 % для водяного пара. Доверительная вероятность в обоих случаях 95 %.

Предложенный метод обработки хорошо применим для линеаризации отдельных участков сигналов и обеспечивает требуемый уровень точности, установленный для испытательного оборудования пожарных оптико-электронных дымовых извещателей. При этом показатель степени аппроксимирующего полинома является определяющим результирующую точность фактором. Так, число локальных экстремумов в исходном сигнале не должно превышать степень полинома. Данное ограничение связано с плохой обусловленностью степенных функций в окрестностях областей с высокой скоростью её изменения.

#### Литература

1. СТБ EN 54-7-2009 «Системы пожарной сигнализации. Часть 7. Извещатели пожарные дымовые точечные, оптические и радиоизотопные».
2. СТБ EN 54-12-2009 «Установки пожарной сигнализации. Часть 12. Извещатели дымовые. Извещатели линейные оптические»

3. Cashdollar K.L., Lee C.K. Singer J.M., Three-wavelength light transmission technique to measure smoke particle size and concentration, *Applied Optics*, Vol. 18, No. 11, 1979, pp.1763-1769.

4. Putorti, A. D., Jr. Design Parameters for Stack-Mounted Light Extinction Measurement Devices. NISTIR 6215; 1999, 34 p.

5. Deepak A., Box M.A. Forward scattering Corrections for Optical Extinction Measurements in Aerosol Media. 1: Monodispersions, *Applied Optics*, Vol. 17, No. 18, 1978, pp.2900-2908.

6. Измерение характеристик воздуха в верхней зоне помещения при горении бумажной продукции / И.Е. Зуйков [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1 (8). – С. 68–72.

7. Зуйков И.Е., Антошин А.А., Олефир Г.И., Третьяк И.Б. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития // Сборник научных трудов «Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики». – Минск : ИПФ НАН Беларуси, 2011. – С. 197–202.

УДК 620.179.16-534.2

### ОБ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.

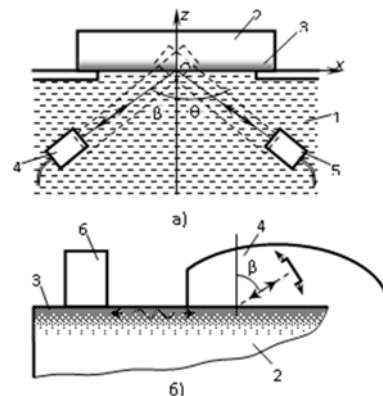
Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одно из важных направлений повышения производительности и надежности контроля качества упрочнения поверхности металлоизделий цементированием, закалкой ТВЧ, лазерным отжигом, накаткой и др. заключается в использовании акустического метода, где в качестве первичного информативного параметра используется скорость распространения поверхностной волны  $C_R$  или другие параметры, существенно зависящие от нее. Скорость  $C_R$  хорошо коррелирует с физико-механическими свойствами стальных и чугунных металлоизделий, включая глубину упрочненного слоя  $\delta$ , твердость  $B$  и др. Для однородного объекта  $C_R = G(\mu)(E/\rho)^{0,5}$ , где  $\rho$  – плотность,  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Если же поверхностный слой объекта неоднородный, то при моделировании распространения упругой волны подбираются некоторые эффективные параметры, определяющие  $C_R$ . Так, для изменения величины скорости распространения волны по объекту со слабонеоднородным упрочненным поверхностным (УП) слоем предложена формула Оулдера:

$$\frac{\Delta \tilde{N}_R}{C_{RO}} \sim \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta E_{ijkl}) F(z) dz, \quad (1)$$

где  $w$  – абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой

через упругое полупространство единичной ширины;  $\Delta E_{ijkl}$  – изменения упругих модулей;  $u_{k,l}$  – поле смещений в волне или тензор смещений; функция  $F(z) \sim \Delta B = B - B_0$ . При реализации амплитудно-угловых методов в качестве коррелирующих со свойствами УП слоя параметров могут быть использованы экстремальные значения углов падения продольной волны  $\beta^*$  на УП слой, определяемые из формулы Снеллиуса:  $C_R = C_L \sin \beta^*$ , где угол  $\beta^*$  соответствует минимуму амплитуды отраженной (рис.1а) или максимуму возбуждаемой в объекте волны (рис.1б).



1 – иммерсионная среда; 2 – образец; 3 – упрочненный слой; 4 – излучающий ПЭП; 5 – приемный ПЭП; 6 – отражатель ПАВ

Рисунок 1 — Схемы экспериментов:

В работе предложены способы повышения эффективности амплитудно-угловых и импульсно-фазовых методов для определения глубины УП слоя стальных образцов, упрочненных цементацией, закалкой ТВЧ, а для образцов чугуна – отбелом. Так, в отличие от зеркально-теневое варианта прозвучивания [1], предложен режим эхо, позволяющий не только уменьшить погрешность установки угла  $\beta^*$  в 1,5-2 раза, но и упростить измерительную процедуру за счет использования вместо приемного преобразователя рефлектора с заданной апертурой.

В качестве иммерсионной среды предложено использовать магнитожидкостный коллоид, что позволяет проводить измерения при различной ориентации контролируемой поверхности объекта и локализации жидкости под воздействием пондеромоторных сил. Как видно (рис.2), этот метод является достаточно простым и позволяет производить оценку глубины УП слоя по корреляционным зависимостям  $\beta^*(\delta)$ . Рекомендуемая длина зондирующей волны  $\lambda_R \geq \delta$ , т.к. при  $\lambda_R > \delta$   $\beta_\delta = d\beta^*/d\delta \rightarrow 0$  (для стальных образцов). Для отбела же на чугуне –  $\beta_\delta < 0$ , что, по видимому, обусловлено влиянием рассеянных в окрестности границы чугуна с отбелом волн. Как видно, чувствительность  $\beta_\delta$  для случая контроля отбела весьма высока, что позволяет использовать этот метод в производственных условиях – при  $R_z$  до ~ 20-30 мкм и выше.

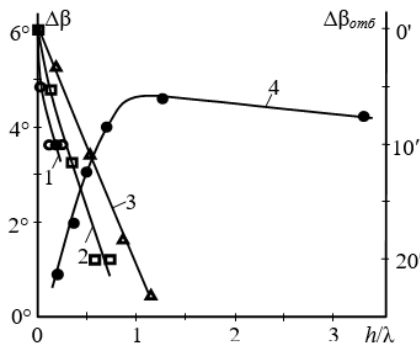


Рисунок 2 – Влияние безразмерной глубины среза стального образца, упрочненного цементацией, на изменения угла экстремума  $\Delta\beta$  (минимума) (1-3), а также изменения  $\Delta\beta$  с ростом безразмерной глубины отбела (4):  $f$ , МГц = 1,1 (1); 3,3 (2); 5 (3)

Поясняемый на рис.1б метод контроля  $\delta$  заключается в определении угла максимума зависимости  $A(\beta)$ , характерной для каждого значения  $\delta$  (рис. 3). Усовершенствование метода заключается в использовании эхо-режима прозвучивания объекта – с помощью одного ПЭП, работающего в совмещенном режиме, и отражателя ПАВ в виде призматического тела специальной формы с острым выступом, контактирующего с объектом через контактную среду [2].

Расчитанные на основе представлений лучевой акустики геометрические параметры отража-

теля обеспечивают соотношение сигнал-шумовой фон не менее 35 дБ. Такие отражатели могут быть использованы для создания опорного сигнала при контроле объектов в труднодоступных местах и имеющих сложный рельеф – как по данным амплитудно-угловых зависимостей, так и при реализации импульсно-фазовых методов. Отметим, что амплитудно-угловые методы имеют погрешность измерений скорости ПАВ больше, чем при использовании импульсно-фазового метода, реализуемого с помощью предложенного высокоточного устройства [3], содержащего один источник УЗК и два приемных малоапертурных ПЭП, расположенных на расстоянии  $L$  между ними.

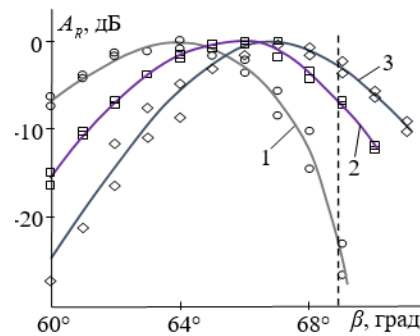


Рисунок 3 – Зависимость нормализованной амплитуды ПАВ от угла призмы  $\beta$ ;  $h^* = 0$  (1); 0,4 (2); 1,5 (3)

Во второй части работы проводится численное и экспериментальное моделирование распространения ПАВ в упрочненных цементацией и ТВЧ закалкой стальных образцах. При этом распределение твердости по высоте имеет трапециевидальную форму, параметры которой варьировались. При этом использовалась зависимость  $\Delta C_R \sim \Delta B$ . Некоторые результаты численного моделирования и опытных данных представлены на рис.4, где приведены зависимости изменения  $C_R$  от толщины среза УП слоя на разных частотах. Как видно, наблюдается неплохое качественное соответствие между данными эксперимента и расчетной модели.

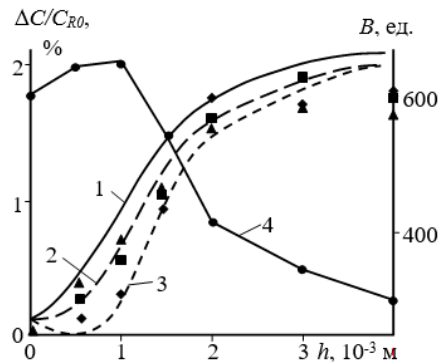


Рисунок 4 – Влияние глубины среза УПС  $h$  на скорость  $C_R$ : эксперимент (●, ■, ◆, ▲) и расчет (1-4): 1-3, ▲, ◆, ■ -  $\Delta C/C_R$ ; 4, ● - твердость  $B$ ;  $f$ , МГц = 1 (1, ▲); 1,8 (2, ◆); 3,8 (■); 4 (3),  $\beta$ , град

Экспериментальные зависимости  $C_R(\delta)$  (рис. 4) являются квазилинейными при  $\delta < (0,6-0,7)\lambda_R$ , а характерный тангенс их наклона с уменьшением частоты падает. Кривая скорости 2 в окрестности максимума функции  $V(\delta)$  претерпевает четко выраженный излом, обусловленный особенностями изменения модуля Юнга, зависящего от твердости УП слоя. Т.о., использование дисперсионных характеристик  $C_R(f)$  является весьма важным не только для определения глубины УП слоя, но и для зондирования распределения по высоте его твердости, бальности зерна и других свойств УП.

*Настоящая работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, проект №Т17-159.*

УДК 621.3.049

### ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА БАЗЕ СТРУКТУР С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) являются элементной базой фотоприёмных устройств различного назначения. Основными параметрами ФЭПП, определяющими область его применения, являются динамический диапазон энергетической характеристики, спектральная чувствительность, быстродействие, зависящие от физических параметров полупроводникового материала. Для расширения динамического диапазона и управления спектральной чувствительностью ФЭПП с собственной фотопроводимостью [1] предложено использовать многозарядные примеси в невысокой концентрации ( $<10^{14}$  см<sup>-3</sup>), формирующие несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне [2].

Особенностью создания структур для таких ФЭПП является требование высокой точности легирования и однородности распределения примеси по объему активной области полупроводника. Традиционные методы легирования при использовании быстродиффундирующих многозарядных примесей, такие как диффузия и ионная имплантация, не обеспечивают необходимую управляемость, точность (прецизионность) и однородность легирования. В связи с чем для создания таких структур был предложен метод твердофазного (плазменного) легирования с использованием лазерной плазмы или плазмы тлеющего разряда [3], отличающийся воспроизводимостью, экологичностью и прецизионностью легирования эпитаксиальных структур. Однако попытки введения цинка и меди в гидридном процессе газоразрядного легирования не увенча-

### Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
2. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн: пат. 9911 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, О.С. Сергеева, М.В. Асадчая, М.А. Тищенко. – № u 20130571; заявл. 08.07.13; опубл. 28.02.14 // Открытия. Изобретения. – 2014. – 4 с.
3. Ультразвуковое устройство для контроля физико-механических свойств изделий: пат. 6160 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов, В.В. Парадинец. – №u20090742; заявл.08.09.2009; опубл. 30.04.2010 // Открытия. Изобретения. – 2010. – 5 с.

лись успехом. Анализ возможных способов распыления твердотельных мишеней, характеризующихся определенными ограничениями на их проводимость и состояние образующейся при этом газовой атмосферы, указывает на целесообразность применения для легирования эпитаксиальных слоев кремния плазмы, формируемой при лазерном облучении мишени [4].

Основным физическим эффектом при воздействии лазерного излучения на твердое тело является образование высокотемпературной плазмы при плотности потока лазерного излучения превышающей критическое значение. В этом случае поглощенная энергия превышает энергию связи атомов в веществе и энергию ионизации. В результате чего слой облучаемого вещества превращается в плазму. Исследования плазменного сгустка на ранних стадиях разлета [4] показали, что в нем можно выделить три зоны, различающиеся плотностью частиц и характером газодинамического движения. На поверхности мишени формируется плотное ядро факела, поглощающее лазерное излучение. Затем следует зона ускорения, в которой происходит переход тепловой энергии плазмы в кинетическую энергию направленного газодинамического движения. Далее реализуется зона, в которой скорость движения частиц плазмы выходит на асимптотическое значение, а тепловая энергия плазмы существенно меньше энергии направленного движения. Поскольку интенсивным эмиттером ионов является, в первую очередь, область плотного горячего ядра, именно эта область и ее параметры представляют наибольший интерес. В работе



[4] получены выражения для оценки внутренней энергии  $E$  (Дж/кг), плотности  $\rho_m$  (кг/м<sup>3</sup>) и массы горячего ядра лазерной плазмы  $M$  (кг) в зависимости от мощности излучения  $W$  (Вт) и начального размера  $r_0$  (см) плазменного сгустка

$$E \approx 5,3 \cdot 10^8 K_0 r_0 W^{4/9}$$

$$\rho_m \approx 1,3 \cdot 10^{-5} K_0 r_0^{-1} W^{1/3}$$

$$M \approx 1,9 \cdot 10^{-6} K_0 t_n r_0^{2/3} W^{5/9},$$

где  $K_0 = z^3(z-1)^{9/2} \cdot A^{7/2}$ ,  $z$  – порядковый номер элемента,  $A$  – его атомная масса.

Как видно, в полученных соотношениях отсутствует зависимость величины  $E$ ,  $\rho_m$ ,  $M$  от вида химической связи между атомами мишени и такими ее параметрами, как температура плавления, теплопроводность, коэффициент поглощения. Определяющими являются мощность излучения и время воздействия лазерного импульса. Проведенное рассмотрение свойств плазмы, образованной действием мощного лазерного излучения на поверхность твердого тела показало, что лазерная плазма может быть использована в качестве источника ионов для синтеза соединений используемых при легировании эпитаксиальных структур глубокими многозарядными примесями. Особенности лазерной плазмы, в первую очередь, определяются высокой скоростью ввода энергии излучения в вещество. При плотности потока излучения  $>10^9$  Вт/см<sup>2</sup> происходит бесфракционное испарение вещества и его лавинная ионизация со степенью близкой к 100 % вне зависимости от теплофизических свойств облучаемого вещества.

Расчеты показывают, что в случае мишени из меди или цинка количество ионов в ядре плазмы может достигать величины  $10^{16}$ - $10^{17}$  ионов в зависимости от энергии лазерного излучения и размера пятна фокусировки. Таким образом в течение времени выращивания эпитаксиального слоя можно создать необходимое число ионов многозарядной примеси для легирования эпитаксиальной структуры в процессе роста. При формировании плазмы лазерным излучением снимается ограничение на величину электрической проводимости мишени, и, следовательно, существенно расширяется перечень материалов, доступных в технологии легирования структур ФЭПП многозарядными примесями, формирующих несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне. Кроме того, воздействие лазерной плазмы на поверхность материалов мишени позволяет осуществить плазмохимический синтез легирующих соединений.

Данный способ лазерного легирования многозарядными примесями реализован в экспериментальной технологической установке, в которой использовался лазер с длиной волны излучения 1,064 мкм и частотой повторения импульсов в многомодовом режиме 12, 25 или 50 Гц. Оптиче-

ская система технологического реактора включала линзу (фокусное расстояние 10 см), полупрозрачное (10 %) зеркало для выделения части излучения и измеритель мощности оптического лазерного излучения для контроля.

При выращивании эпитаксиальных структур кремния перед входом в реактор эпитаксиального наращивания смешиваются четыре потока:

- водород  $H_2$ ,
- $H_2 + SiCl_4$ ,
- $H_2 +$  мелкая легирующая примесь,
- $H_2 +$  многозарядная примесь.

Легирующая смесь с многозарядной примесью создается в реакционной камере путем воздействия излучения лазера на мишень, содержащую легирующий элемент (медь или цинк), при продувке зоны реакции водородом.

В хлоридном процессе эпитаксии при использовании мишеней из меди или цинка, облучаемых лазером, сформированы эпитаксиальные структуры кремния легированные цинком и фосфором, а также медью и фосфором, с концентрацией многозарядной примеси в диапазоне  $10^{13}$ - $2 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Затем на их основе созданы фоторезистивные структуры ФЭПП с собственной фотопроводимостью, в которых за счет введения глубокой многозарядной примеси удалось расширить динамический диапазон энергетической характеристики ФЭПП и реализовать переключение характеристики спектральной чувствительности (со сдвигом «красной границы» на 2-4 мкм) под воздействием дополнительного оптического излучения [1].

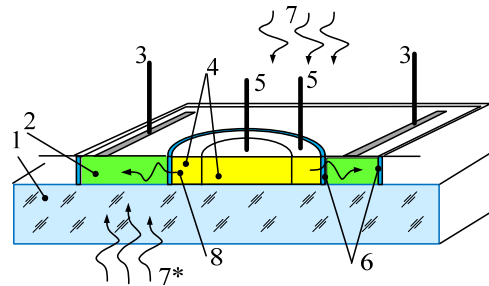


Рисунок 1 – Структура управляемого ФЭПП на сапфировой подложке: 1 – сапфировая подложка, 2 – фоторезистивный ФЭПП на основе полупроводника с глубокой многозарядной примесью, 3 – выводы ФЭП, 4 – управляющий  $p$ - $n$  светодиод, 5 – выводы светодиода, 6 – слои изолирующего диэлектрика, 7 – входной оптический сигнал, 8 – управляющее излучение

Отметим, что предложенная технология формирования полупроводниковых структур с низкой концентрацией примеси хорошо совмещается с «около кремниевыми» технологиями и структурами  $Si$ ,  $Si:Ge - A^3B^5$  на сапфире [5]. Одна из таких возможных совмещенных структур приведена на рисунке 1. Области 4 полупроводника типа  $A^3B^5$  формируют управляющий свето-

диод, а область 2 представляет управляемый многофункциональный ФЭПП. Рядом могут быть расположены элементы усилителей или коммутирующих, часто выполняемых по КМОП-технологии, устройств.

Многофункциональные одноэлементные ФЭПП на основе полупроводников с собственной проводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе одновременное определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения.

### Литература

1. Воробей, Р.И. Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными фотоприемниками / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская // Приборы и методы измерений, 2018. – № 3. – С. 215–226.

2. Vorobey, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhembitskaya, K. Kierczynski // Przegląd elektrotechniczny, – № 5. – 2014. – Pp. 5–78

3. Баборыкин В.П., Семеников А.И., Яржембицкий В.Б. Лазерная технология легирования кремниевых эпитаксиальных структур / Плазменные и лазерно-стимулированные процессы в микроэлектронике. – Ростов Великий, 4-8 февраля 1991. – С. 34.

4. Бункин, Ф.В., Термическое действие лазерного излучения / Ф.В. Бункин, И.А. Кириченко, Б.С. Лукьянчук // Успехи физических наук, 1982. – Т. 138, № 9. – С. 45–94.

5. Andreou, A.G. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems / A.G. Andreou, Z.K. Kalayjian, A. Apsel, P.O. Pouliquen, R.A. Athale, G. Simonis, R. Reedy // Circuits and Systems. – 2001. V.1. – P. 22–30.

УДК 620.179.16-534.2

## О ВОЗБУЖДЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Митьковец А.И.<sup>2</sup>, Коновалов Г.Е.<sup>1</sup>, Парадинец В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Магнитные жидкости (МЖ) обладают агрегативной и седиментационной устойчивостью и относятся к классу высокостабильных коллоидных растворов наноматериалов, легко управляемых внешним электромагнитным полем [1]. Учитывая опыт предыдущих исследований оптических, акустических свойств МЖ, нами предложено использовать их объемы в качестве оптоакустического (ОА) преобразователя импульсного лазерного излучения (ЛИ) в упругие волны (УВ). В частности, это касается толщинометрии тонкостенных изделий толщиной до  $\sim 10^2$  мкм и радиусом кривизны до  $\pm 1$  см, ввода в твердые тела высокоинтенсивных упругих волн разной направленности (продольные, поперечные, пластинчатые и др.) и длительностью до  $\sim 10^8$  с; измерения интенсивности ЛИ и др. Если  $f(t)$  представляет собой временную функцию интенсивности лазерного излучения,  $A_r$  и  $D$  – коэффициенты прохождения света и упругих волн через границу твердое тело–жидкость, то вектор Умова–Пойнтинга потока интенсивности возбуждаемых волн согласно закону Бугера имеет вид:

$$\langle \vec{S}_u \rangle = J_s A_r f(t) \frac{d}{dz} \left[ \exp \left( - \int_0^z \alpha(z', t) dz' \right) \right] \vec{n},$$

где коэффициент поглощения света в коллоиде  $\alpha_1 = \alpha_1(z)$ . В работе [2] нами впервые была изуче-

на передаточная функция ОА преобразования  $\tilde{F}$  в режиме отражения от границы кварц-МЖ. Последняя имеет слабо выраженный максимум, определяемый теплофизическими, акустическими свойствами коллоида, дисперсионной среды, а также отношением акустических сопротивлений кварцевого световода и МЖ  $r = R_q/R_{мж}$ .

В настоящей работе экспериментально изучены особенности ОА возбуждения упругих волн при прохождении ЛИ через границу кварц-МЖ и воздух-МЖ с последующим их приемом с оппозитной стороны пьезопреобразователем (теневой режим). Необходимость таких исследований вызвана необходимостью уточнения физического механизма ОА-преобразования и возможными (как указано выше) применениями МЖ в качестве ОА-преобразователя для различных применений, включая измерение интенсивности ЛИ.

Экспериментальная проверка возможности использования предложенного метода в прикладной акустике и оптоакустике проведена в теневом режиме – согласно схеме, подобной той, что приведена на рис. 1. Диаметр луча ЛИ, генерируемого лазером типа ЛОТИС, 5 мм, а максимальный диапазон варьируемой энергии потока ЛИ, падающего на границу световод-МЖ,  $W = 1-120$  мДж. Объектом исследования служили высокоустойчивые образцы МЖ на основе син-

тетического масла с концентрацией магнетика, варьируемой в диапазоне  $Q = 0,29-8,3$  %. Высота слоя МЖ или акустической задержки  $L = 1,5$  см.

Электронная схема измерений стандартная и подобна той, что приведена в работе [2]. Стабильность излучаемой генератором ЛИ энергии  $\sim 5$ %. Изменяя интенсивность источника ЛИ и измеряя его с помощью прибора ПЭ-25SH, строилась зависимость импульсного сигнала  $U \sim A$  в мВ от энергии излучения  $W$ . Исследования проводились преимущественно при генерации ЛИ с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм, а также – с  $\lambda = 1,06$  мкм. Рабочая частота приемного преобразователя (ПЭП) 5и 9 МГц.

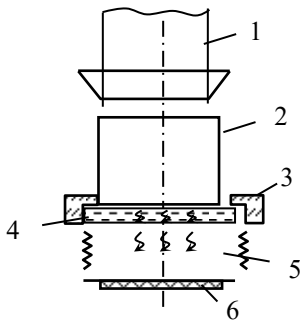


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследования ОА преобразования в МЖ: 1 – лазерный луч; 2 – световод; 3 – уплотнитель; 4 – МЖ; 5 – звукопровод; 6 – ПЭП

Базовые результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2 и 3. Как впервые установлено, для всех представленных образцов МЖ с варьируемой концентрацией магнетика  $Q = 0,29-8,3$  % зависимости амплитуды принимаемого сигнала  $U(W)$  в исследованном диапазоне изменения энергии ЛИ (два порядка) являются линейными – независимо от граничных условий, обусловленных отношением акустических импедансов МЖ и световода. При этом максимальная эффективность передачи возбуждаемых в коллоиде ЛИ акустических колебаний в твердое тело достигается именно в том случае, когда МЖ контактирует с кварцевым световодом. Причем максимум зависимости  $U(W)$  является слабо выраженным (диапазон  $Q = 1,5-5$  %) и находится в окрестности  $Q \sim 1,7$  %. Если же акустическая нагрузка световода нулевая (граница воздух–МЖ), то максимум величины акустического сигнала  $U$  достигается в окрестности  $Q \approx 0,5$  %.

Используя некоторые положения теории [3], был проведен анализ опто-акустического тракта и качественно показано, что если ОА-возбуждение осуществляется в режиме длинного импульса ( $\alpha_1^{-1} < C_A \omega^{-1}$ ), то максимум принимаемого сигнала достигается именно в случае, когда имеется граница кварц-МЖ. Как обнаружено в работе [2], этот режим реализуется при  $Q \geq 2-3$  %. Полученные результаты исследований представляют значительный интерес для ряда приложений в технической акустике. С одной

стороны – для создания коротких и мощных импульсов с высокой направленностью возбуждаемых в твердом теле волн, что требуется для толщинометрии, обнаружения дефектов

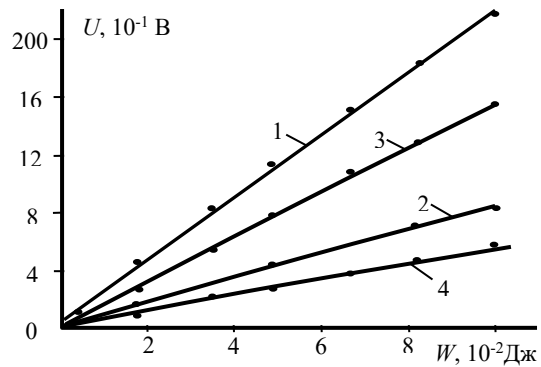


Рисунок 2 – Амплитуда УЗК при ОА-преобразовании на границе воздух–МЖ (1, 2); кварц–МЖ (3, 4):  $Q, \% = 0,29$  (1, 2); 7,3 (3, 4)

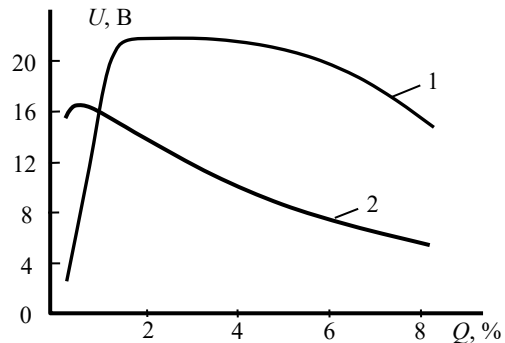


Рисунок 3 – Влияние концентрации магнетика на амплитуду акустического сигнала при воздействии лазерного излучения на границу кварц–МЖ (1) и воздух–МЖ (2)

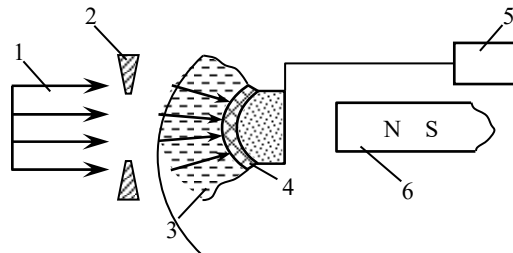


Рисунок 4 – Пример фокусировки энергии УЗК, возбуждаемых лазерным излучением, путем деформации объема МЖ магнитным полем для измерения интенсивности лазерного излучения и др. акустических приложений: 1 – лазерный луч, 2 – диафрагма, 3 – МЖ; 4 – пьезопреобразователь; 5 – приемник электрических колебаний; 6 – магнитная система

с малой отражающей способностью [4], измерения скорости УЗК, коррелирующей со структурой материала. С другой стороны, учитывая высокую эффективность ОА преобразования в МЖ, устойчивость и управляемость ее поверхности под воздействием магнитного поля, представляет значительный интерес использовать МЖ для измерения

интенсивности ЛИ, изменяемой по величине практически на 3 порядка и существенно расширенном диапазоне длин волн ЛИ. На рис.4 приведена одна из опытных схем, позволяющая фокусировать с помощью магнитного поля возбуждаемые ЛИ упругие волны, что представляет интерес как для измерения интенсивности ЛИ, так и для других акустических измерений.

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ, проект №Т15-153.*

### Литература

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига, Зинатне. 1989. – 389 с.

2. Гусев, В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. Москва : Наука, 1991. – 304 с.

3. Способ оптоакустического контроля качества неразъемного соединения двух материалов: пат. 17526 Респ.Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, В.Г. Гуделев, А.И. Митьковец. – № а20111234; заявл. 23.09.11; опубл. 30.04.13 // Открытия. Изобретения. – 2013. – 4 с.

4. Баев, А.Р. Оптоакустический метод ультразвуковой дефектоскопии и измерения физико-механических свойств твердых тел / А.Р. Баев, А.И. Митьковец, В.Г. Гуделев, Д.А. Костюк // Материалы 7-й Межд. науч. конф. «Лазерная физика и оптические технологии», ИФ им. Степанова НАН Беларуси. – Минск. – 2008. – Т 1. – С. 85–88.

УДК 681.2.082

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Таратын И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, Республика Беларусь

Для проведения анализа состава газовой среды широко используются полупроводниковые сенсоры. Основным материалом при разработке таких датчиков является кремний. Особое внимание при изготовлении сенсорных элементов следует уделять качеству подготовки поверхности подложек. Основной тип конструкций полупроводниковых сенсоров представляет собой кремниевую подложку, на поверхности которой сформирован диэлектрический слой, нагреватель, информационные электроды со сформированным на их поверхности газочувствительным слоем [1]. В силу своих полупроводниковых свойств поликристаллический кремний может выступать в качестве чувствительного элемента.

В ходе выполнения эксперимента по исследованию газочувствительных характеристик полупроводниковых свойств сенсорных элементов на кремниевых подложках был изготовлен чувствительный элемент из поликристаллического кремния размером 2,2x2,2x1,5 мм<sup>3</sup>. Полученный элемент был установлен в корпус с применением метода контактной сварки платиновой проволокой толщиной 20 мкм (рисунок 1). Кремний выполняет функцию нагревателя и информационных электродов. В качестве газочувствительного слоя был использован раствор SnO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Газочувствительный слой был получен с применением золь-гель методов и сформирован на поверхности сенсора с помощью микрошприца послойным путем [2]. Затем сенсор находился подключенным к источнику питания при токе 91 мА в течении 17 ч. Вольтамперные характеристики представлены на рисунке 2.

Вольтамперная характеристика при прямом ходе получена путем увеличения значения по-

даваемого тока на нагреватель, обратный ход – путём уменьшения значения тока. Как видно из рисунка 2 значения выходных характеристик не совпадают при прямом и обратном ходе, что вызвано особенностями тепловых характеристик взаимодействующих материалов. Затем сенсор был оставлен на 43 ч для формирования газочувствительного слоя при I=91 мА. Вольтамперная характеристика после длительного отжига представлена на рисунке 3.

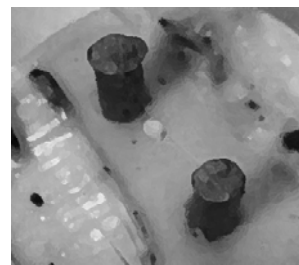


Рисунок 1 – Внешний вид полупроводникового сенсорного устройства с кремниевым нагревателем (с газочувствительным слоем)

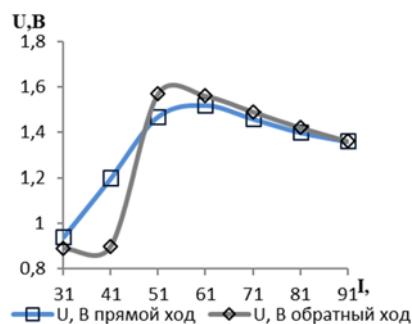


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика чувствительного элемента с кремниевым нагревателем до отжига

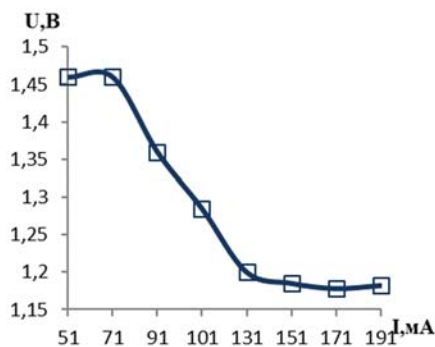


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика чувствительного элемента с кремниевым нагревателем после отжига 43 ч

После длительного отжига наблюдается стабилизация по напряжению сигнала сенсора (рисунок 3). Как известно, применение кратковременных отжигов позволяет увеличить значение выходного сигнала [3]. Для определения влияния таких отжигов на кремниевый чувствительный элемент был проведен отжиг при  $I=291$  мА в течении 15 с. Вольтамперная характеристика представлена на рисунке 4.

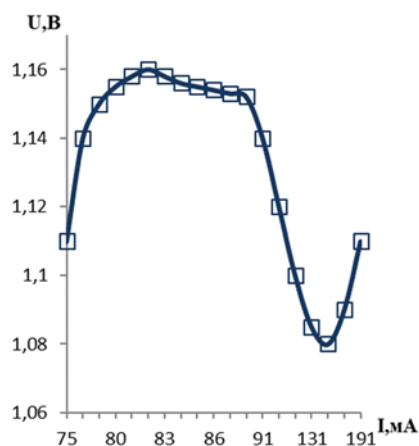


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика чувствительного элемента с кремниевым нагревателем после кратковременного отжига 15 с  $I=291$  мА

В результате проведенной серии отжигов было установлено, что стабилизация выходных характеристик достигается после термообработки поверхности газочувствительного слоя. При этом участок с линейной характеристикой после отжигов смещается влево, что приводит к уменьшению потребляемой мощности сенсора.

Для установления зависимости температуры чувствительного элемента сенсора были проведены измерения с помощью пирометра IP-140, работающего в диапазоне температур 100-1000 °С. Для детектирования горючих и токсичных газов температура газоанализирующей поверхности в выпускаемых сериях полупроводниковых сенсоров составляет 350-450°С [1]. По полученным данным эксперимен-

та до проведения отжигов в рабочем диапазоне температур потребляемая мощность кремниевого нагревателя составила 80 – 120 мВт. В свою очередь для определения некоторых опасных газов температура газочувствительного слоя должна достигать 700 °С.

После проведенных отжигов температура чувствительного элемента увеличилась до 400-550 °С при потребляемой мощности 80 – 120 мВт (рисунок 5).

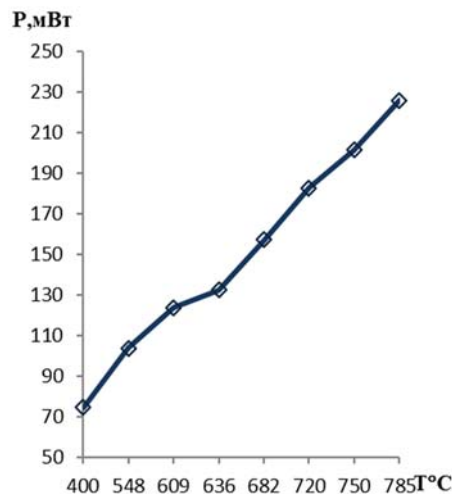


Рисунок 5 – Зависимость потребляемой мощности от температуры нагревателя полупроводникового сенсорного устройства

Использование в конструкции газовых сенсоров чувствительного элемента из поликристаллического кремния, который выполняет функции нагревателя, позволяет использовать его в качестве детектора взрывоопасных и бытовых газов (метан, пропан). Потребляемая мощность при этом не превышает 200 мВт при температуре  $730 \pm 5$  °С. Особенностью таких датчиков является простота конструктивного исполнения, не требующая применения сложных технологических процессов формирования многослойных структур и мембран.

### Литература

1. Васильев, А., Олихов, И., Самотаев, Н. Технология «нано-на-микро» улучшение характеристик газовых сенсоров / А. Васильев, И. Олихов, Н. Самотаев // ЭЛЕКТРОНИКА, наука, технология, бизнес, 2011. – № 1. – С. 36–44.
2. Реутская, О.Г. Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO, H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO<sub>2</sub> / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, Ю.М. Плещачевский // Приборы и методы измерений, 2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.
3. Реутская, О.Г. Измерения концентрации газов CO и NO<sub>2</sub> мультисенсорной микросистемой в режиме импульсного нагрева / О.Г. Реутская, Ю.М. Плещачевский // Приборы и методы измерений, 2017. – Т. 8, № 2. – С. 160–167.

УДК 620.179.111

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ ЗОНЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Деленковский Н.В., Гнусин А.Б.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Существенное повышение качества капиллярного контроля может быть достигнуто более широким использованием люминесцентного метода, который, по сравнению с цветным, позволяет выявлять дефекты с раскрытиями менее 1 мкм. Одним из факторов, препятствующим этому, является отсутствие недорогих эффективных портативных ультрафиолетовых (УФ) облучателей. Так, например, известные переносные облучатели типа КД-32Л на основе ртутных ламп низкого давления ЛУФ-4-1 неудобны в использовании по причине значительных габаритов и повышенной опасности облучения оператора жестким ультрафиолетом. Портативные лампы на УФ светодиодах типа «UV Inspector 2000» производства немецкой фирмы «Helling» имеют высокую цену, главным образом, из-за высокой стоимости мощных (3 Вт) УФ светодиодов (длина волны 365 нм). Кроме того, при использовании вышеуказанных устройств затруднительно обеспечить необходимое затемнение зоны контроля, что ограничивает их использование в случае проведения люминесцентного контроля в дневное время при высокой естественной освещенности объекта.

Целью настоящей работы является разработка недорогого эффективного переносного устройства для освещения зоны контроля при проведении капиллярного люминесцентного контроля в полевых условиях.

С целью установления возможности замены дорогих УФ светодиодов более дешевыми и безопасными при использовании аналогами нами проведены исследования синих ARL2-3214UBC-3 cd (460 нм) и фиолетовых ARL2-3214UVC-180 mcd (400 нм) светодиодов фирмы Arlight. Эффективность источников освещения на основе вышеуказанных светодиодов при проведении капиллярного контроля сравнивалась с УФ лампой Helling SUPERHELL C10A (365 нм).

Результаты капиллярного контроля образцов [2] с дефектами шириной раскрытия 1-5 мкм представлены на рисунке 1.

При визуальном рассмотрении, а также на основе количественной оценки выявляемости дефектов по методике [2] можно сделать следующие выводы.

Использование при люминесцентном капиллярном контроле фиолетовых светодиодов со средними длинами волн 400 нм и яркостью освещения  $\approx 32000$  Кд/м<sup>2</sup> обеспечивает выявляемость дефектов с раскрытиями 1-10 мкм и глубиной до 1 мм сопоставимую, а иногда и превыша-

ющую выявляемость при использовании УФ лампы Helling SUPERHELL C10A. Средняя яркость следов дефектов при освещении блоком светодиодов аналогична средней яркости при освещении УФ-лампой Helling. Контраст индикаций относительно окружающего фона при использовании указанных светодиодов снижается в среднем на 15-20 % по сравнению с УФ-лампой Helling.

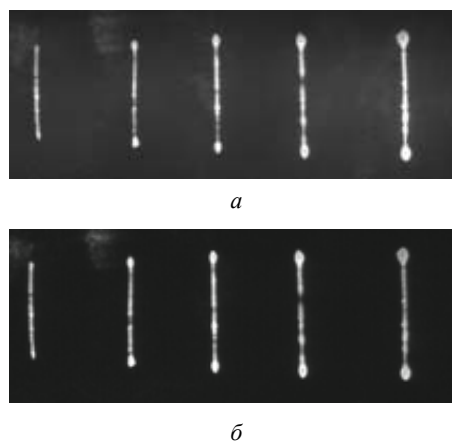


Рисунок 1 – Выявляемость дефектов на контрольных образцах при освещении светодиодами ARL2-3214UVC-180mcd, 400 нм (а) и УФ-лампой Helling, 365 нм (б)

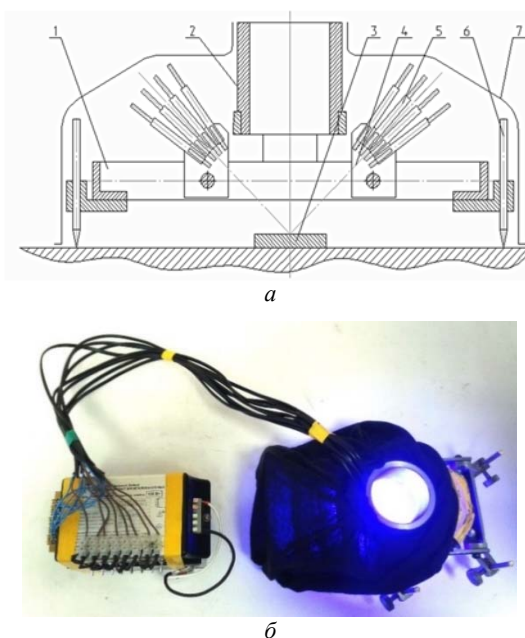


Рисунок 2 – Схема (а) и фотография (б) устройства для освещения зоны контроля светодиодами при проведении люминесцентной капиллярной дефектоскопии

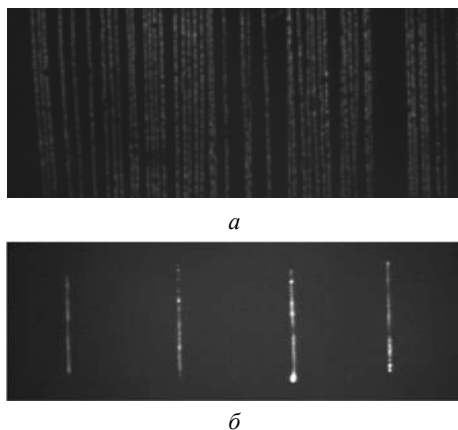


Рисунок 3 – Выявляемость дефектов на контрольных образцах при освещении устройством на основе светодиодов ARL2-3214UVC-180mcd (400 нм). а – образец по EN ISO 3452-2 [3], б – образец [4]

На основании проведенных исследований было разработано и изготовлено устройство для освещения зоны контроля при люминесцентной капиллярной дефектоскопии с использованием фиолетовых светодиодов со средней длиной волны 400 нм. Схема и фотография устройства приведены на рисунке 2.

С целью обеспечения высокой чувствительности контроля в данном устройстве были использованы 8 дугообразных плат, содержащих по 25 ориентированных на одну точку светодиодов ARL2-3214UVC-180mcd (400 нм), обеспечивающих для каждой платы на пятне диаметром 35-45 мм яркость до 4000 Кд/м<sup>2</sup>.

Устройство состоит из основания 1, на котором по центру установлена цилиндрическая втулка 2 с отверстием для визуального наблюдения зоны контроля изделия 3. Слева и справа от втулки 2 на основании 1 закреплены держатели 4, на каждом из которых установлены по четыре платы 5 со светодиодами. Основание 1 устанавливается в зоне контроля на регулируемых опорах 6. Для защиты зоны контроля от видимого света используется чехол 7 из светонепроницаемой ткани. Аккумуляторный блок питания обеспечивает возможность автономного использования устройства в полевых условиях.

УДК 004.056.53

## ОЦЕНКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Бондарев В.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

При проектировании и построении комплексной системы защиты информации одной из самых сложных проблем является выбор конкретного средства защиты информации из возможных, представленных на рынке. Другими словами, нам приходится проводить сравнитель-

ный анализ, оценку и выбор средства защиты, руководствуясь какими-то критериями, требованиями и прочее. Чаще всего этот выбор основывается на основе профессионального опыта, интуиции, цене, наличии сертификата и т. д., то есть чисто умозрительно, без привлечения

Через смотровое окно втулки 2 возможно проводить фотосъемку индикаторных следов дефектов. На рисунке 3 представлены результаты капиллярного люминесцентного контроля образцов с дефектами раскрытием 0,5-10 мкм [3, 4], полученные с использованием данного устройства. Из рисунка видно, что подсветка зоны контроля при помощи описываемого устройства обеспечивает надежную выявляемость дефектов с шириной раскрытия менее 1 мкм.

### Выводы

Впервые показана возможность эффективного применения светодиодов со средней длиной волны 400 нм в качестве источников освещения при выявлении дефектов в люминесцентном капиллярном контроле.

Разработан переносной осветитель для люминесцентной дефектоскопии на основе светодиодов с длиной волны 400 нм. Устройство имеет значительно более низкую стоимость по сравнению с аналогами и обладает большей безопасностью в работе. Устройство может эффективно использоваться при проведении люминесцентного капиллярного контроля в полевых условиях для выявления поверхностных дефектов с раскрытием от 1 мкм.

### Литература

1. Migoun N., Delenkovsky N., Gnusin A. Electrochemical Machining for Penetrant Testing in Field Conditions // 18th World Conference on Nondestructive Testing. 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
2. Н.П. Мигун, А.Б. Гнусин, И.В. Волович. Компьютеризированная система определяет качество дефектоскопических материалов // Промышленная безопасность. – 2004. – № 1. – С. 34–36.
3. EN ISO 3452-2. Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 2: Testing of penetrant materials.
4. Мигун Н.П., Деленковский Н.В. Гнусин А.Б. Новые средства определения чувствительности дефектоскопических материалов для капиллярного контроля // Метрология и приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 16–18.

методов и способов формализации. Автор ни разу не сталкивался с математическим аппаратом, который можно было бы положить в основу данного выбора и тем самым добиться хоть какой-то объективности. Данная работа и представляет попытку оценить средства защиты, опираясь на формальные приёмы и методы. Надо сказать, что основные положения статьи были разработаны в моей кандидатской диссертации, где не без успеха удалось ранжировать средства космического нападения эвентуального противника по степени опасности и, тем самым, разработать облик системы предупреждения о космическом нападении.

Вначале необходимо вспомнить или ввести ряд необходимых понятий.

**Оценка.** Под оценкой будем понимать установление степени соответствия объекта, в данном случае средства защиты информации, нормам, требованиям, эталонам.

Отображением объекта/средства защиты информации в средстве оценки является **мера объекта** – единство качественной и количественной определенности объекта:  $M = (\text{качество, количество})$ .

**Качество** – совокупность свойств, отличающая данный объект от другого объекта.

**Количество** – выражение однородности объектов.

**Оценка систем** сводится к измерению – оценке соответствия меры системы некоторым эталонам, критериям. В отдельных случаях может производиться сравнительная оценка объектов, в данном случае – средств защиты информации.

Обычно свойства выражают или количественно, или качественно: каждое свойство описывают количественно с помощью некоторой переменной – показателя свойства, значение которого характеризует уровень качества относительно этого свойства.

Уровень качества объекта характеризуется совокупностью показателей свойств, необходимых для соответствия объекта его назначению.

Эта совокупность называется **показателем качества** объекта.

Требуемые качества задаются условиями, которым должны удовлетворять возможные значения показателя качества.

Эти условия называются **критериями оценивания**, а проверка их выполнения – **оцениванием** качества объекта.

А сейчас все введенные понятия попытаемся облечь в виде математического аппарата, может быть, к сожалению, и не совсем совершенного.

**Описание средства защиты информации в виде меры**

Представим меру в виде

$$M = \begin{bmatrix} C_1, C_2, C_3 \dots, & C_n \\ v_{c_1} v_{c_2} v_{c_3} & v_{c_n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – свойства объекта;  $v_{c_i}$  – величина (количество) свойства.

Например, описывая межсетевой экран, можно предложить следующие группы свойств и количеств этих свойств:

- физические параметры (WAN, LAN, DMZ, консоль, размер...);
- производительность (производительность межсетевого экрана, кол-во пользователей, параллельные сессии, 3DES, политики, работа по расписанию...);
- работа в режиме межсетевого экрана (NAT, PAT, прозрачный режим, режим маршрутизации, статическая, динамическая, Virtual IP, NAT на основе политик, фильтрация пакетов в туннелях VPN.....) и т. д.

Требуемая мера (стандарт, критерий):

$$M_K = \begin{bmatrix} C_1, C_2, \dots, & C_n \\ v_{c_1}^K v_{c_2}^K & v_{c_n}^K \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Мера предмета деятельности:

$$M_{\Pi} = \begin{bmatrix} C_1, C_2, \dots, & C_n \\ v_{c_1}^{\Pi} v_{c_2}^{\Pi} & v_{c_n}^{\Pi} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Близость мер определяется одним из возможных показателей:

$$K_N = \frac{N_{M_K \cap M_{\Pi}}}{N_{M_K \cup M_{\Pi}}}; \quad (4)$$

$$K_N = \frac{\sum_{N_{M_{\Pi}}} \left[ \frac{v_{c_i} \min}{v_{c_i} \max} \right]}{N_{M_{\max}}}, \quad (5)$$

где  $N_{M_K}, N_{M_{\Pi}}$  – мощности  $M_K, M_{\Pi}$ ;  $N_{M_{\Pi}}$  – мощность пересечения множеств  $C^{\Pi}, C^K$ ;  $N_{M_{\max}}$  – мощность объединения множеств  $C^{\Pi}, C^K$ .

Качество объекта характеризуется декартовым произведением свойств, а величина этого качества – произведением величин этих свойств.

$$M_K = \begin{bmatrix} C_1, C_2, \dots, & C_n \\ \prod_i & v_{c_i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Методика оценки близости мер

1. Объединяем мощности множеств  $C$  в  $M_0, M_3: N_{C^0}, N_{C^3}$ .

2. Представляем  $M_0 \cap M_3$  в виде:

$$M = \begin{bmatrix} C_m, & C_{m+1}, \dots, & C_n \\ v_{c_m}^0 & v_{c_{m+1}}^0 & v_{c_n}^0 \\ v_{c_m}^3 & v_{c_{m+1}}^3 & v_{c_n}^3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. В каждой паре определяем min- и max-величины.

4. Подставляем значения  $v_{c_i} \min, v_{c_i} \max, \max(N_{C^3}, N_{C^0})$  в  $K_N$ .

Пример.

$$M_0 = \begin{bmatrix} C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, \\ 2 \ 3 \ 4 \ 1 \ 5 \end{bmatrix}. \quad N_{M_0} = 5.$$



$$M_3 = \begin{bmatrix} C_1 & C_3 & C_4 \\ 1 & 3 & 2 \end{bmatrix}. \quad N_{M_3} = 3.$$

$$K_N = \frac{1}{5} \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{1}{2} \right) = \frac{7}{20}. \quad N_{M_n} = 3.$$

Необходимо упомянуть о слабых местах данного подхода. Во-первых, мы исходим из того, что свойства оцениваемого объекта независимы, что на практике встречается крайне редко. Во-вторых, открытым остаётся вопрос, сколько нужно учитывать этих свойств для получения максимально объективной оценки. И, наконец, по умолчанию считается, что рассматриваемые и учитываемые свойства обладают одинаковым весом для оценки, что также встречается нечасто. Однако эти недостатки не носят принципиального характера и могут быть устранены в процессе дальнейших исследований.

#### **Выводы**

Сделана попытка добиться максимальной объективности при сравнении различных средств защиты информации. Предлагаемая методика была апробирована автором на практике. Были рассмотрены шесть наиболее широко применяемых (согласно статистике портала Securitylab.ru) сканеров уязвимостей: Nessus (версия 3.2.1); MaxPatrol (версия 8.0.1178); Internet Scanner (версия 7.2.58); Retina Network Security Scanner (версия 5.10.2.1389); Shadow Security Scanner (SSS) (версия 7.141.262); NetClarity Auditor (версия 6.1).

Рассматривались следующие свойства и количества этих свойств: цена сканера; универ-

сальность применения сканера (число поддерживаемых протоколов и векторов доставки – методов доставки данных к серверу); количество поддерживаемых векторов атаки (количество и тип активных плагинов); точность обнаружения CSS; точность обнаружения SQL-инъекций; точность обхода структуры веб-приложения и обнаружения локальных файлов; удаленное использование файлов, XSS; фишинг через RFI; WIVET-сравнение; адаптивность сканера (количество дополнительных возможностей сканера для преодоления защитных барьеров); сравнение особенностей аутентификации (количество и тип поддерживаемых способов авторизации и аутентификации); количество дополнительных возможностей сканирования и встроенных механизмов; общее впечатление о работе основной функции сканирования; наличие лицензий и сертификатов и т. д.

В результате применения методики первое место занял сканер MaxPatrol, на втором месте – сканер Nessus. Эти результаты были подтверждены экспериментальными исследованиями.

#### **Литература**

1. Колесников и др. Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов, М.: Машиностроение, 1985.

2. Бондарев В.В. Возможный подход к оценке средств защиты информации// Информационно-методический журнал INSIDE. Защита информации. – № 3 – 2017, С. 76–78.

УДК 621.382

### **ОДНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

**Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Современные измерительные преобразователи систем оптической диагностики должны автоматически оценивать параметры оптического сигнала и переключаться между различными диапазонами энергетической и спектральной характеристиками чувствительности. Это требует применения нескольких фотоприемников, сложных оптических схем и сложных алгоритмов обработки измерительных сигналов. Относительная сложность физических процессов при перезарядке нескольких энергетических уровней многозарядной глубокой примеси позволяет реализовать многофункциональность фотозлектрического преобразователя (ФЭП) при простой конструкции чувствительного элемента. Фотоэлектрические одноэлементные преобразователи [1] характеризуются расширенными функциональными характеристиками и увеличенными диапазонами энергетической (на несколько десятков децибел

и спектральной характеристик чувствительности (со сдвигом на 2–4 мкм в диапазоне спектральной чувствительности 1–10 мкм), с возможностью переключения между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристик чувствительности под действием как измерительного сигнала, так и дополнительных управляющих воздействий. В качестве основного материала резистивной или барьерной структуры фотоприемника могут использоваться германий, кремний, полупроводниковые соединения типа  $A^3B^5$ , и другие материалы, в том числе совместимые с «не кремниевыми» технологиями и структурами на сапфировых подложках. Характеристиками: функциональностью и параметрами ФЭП можно управлять выбором структуры и материала основного полупроводника, технологией изготовления, режимами питания и смещения, дополнительным оптическим излучением [1–3].

В основе предлагаемых для построения измерительных преобразователей систем оптической диагностики ФЭП лежит физическая интеграция процессов внутри объема чувствительного элемента, построенного на базе полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси [1-2], формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, с поверхностно-барьерной или резистивной структурой.

Относительная сложность физических процессов при перезарядке нескольких энергетических уровней многозарядной глубокой примеси позволяет реализовать многофункциональность фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) при простой конструкции чувствительного элемента [1]. ФЭП представляет собой фоторезистивную R1, R2 или барьерную структуру VD1 с длинной базой (рисунок 1), в зависимости от типа используемых контактов (омический контакт или барьер Шоттки).

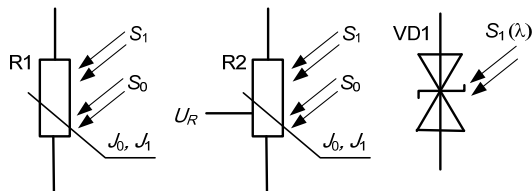


Рисунок 1 – Приборные структуры ФЭП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями

Контакт, через который вводится оптический сигнал  $S$  выполняется полупрозрачным, причем для уменьшения коэффициента оптического отражения поверхность полупроводника может профилироваться. Управляющий электрод наносится при необходимости управления свойствами ФЭП с использованием электрического канала управления (R2 на рисунке 1). При управлении характеристиками ФЭП дополнительным оптическим сигналом  $S_0$ , часто вне спектрального диапазона чувствительности датчика, он вводится вместе с основным через прозрачный электрод или с торца ФЭП.

Многофункциональность и возможность управления характеристиками таких ФЭП определяет значительно большую сложность их эквивалентных схем, используемых при моделировании электрических схем измерительных преобразователей. Например, эквивалентная схема барьерной структуры VD1 с длинной базой со встречно включенными диодами Шоттки включает в себя источники напряжения, управляемые светом, фоторезисторы, элементы цепей внутренней обратной связи.

Физической основой работы объемно перезаряжаемых светом или электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности [1-3] неравновесных но-

сителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси (рисунок 2). Причем для полупроводников с примесью акцепторного типа изменение постоянных времени жизни и рекомбинации достигает нескольких десятичных порядков [1-2], а для полупроводников с примесью донорного типа это изменение составляет величину менее 1 %, что связано с тем, что энергетические уровни примеси (Se, S) уже заполнены (рисунок 2, b).

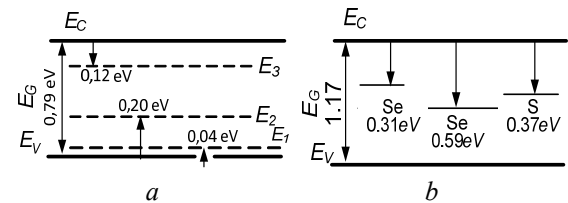


Рисунок 2 – Энергетические диаграммы собственного полупроводника: (a) Ge, легированного Pt ( $E_1, E_2, E_3$  – энергетические уровни платины в зарядовых состояниях  $(-2, -1), (-3, -2), (-1, 0) eV$ ) и энергетические уровни примесей Se и S в кремнии (b)

В фотоприемниках, слабо легированных рядом примесей с акцепторными свойствами, примесь формирует два или три глубоких уровня в нескольких зарядовых состояниях. При этом характеристики приборной структуры с глубокими многозарядными примесями определяются, в основном, характером рекомбинационных процессов через уровни примеси. Закономерности формирования сигнала ФЭП связаны с изменением эффективного времени жизни и подвижности с уровнем инжекции. Зависимость времени жизни основных  $\tau_n$  и неосновных  $\tau_p$  носителей заряда от уровня возбуждения для германия и кремния, легированного глубокими примесями с несколькими многозарядными уровнями, характеризуется диапазоном изменения до четырех десятичных порядков величины, что и обеспечивает расширение динамического диапазона энергетической характеристики и возможность управления фотоэлектрическими характеристиками ФЭП.

Границами поддиапазонов  $J_L$  и  $J_H$  энергетической характеристики чувствительности можно управлять изменением концентрации многозарядной примеси и ее типом [3]. Отметим, что при переходе от одного поддиапазона к другому, вследствие задействования различных энергетических переходов изменяется и вид спектральной характеристики чувствительности такого ФЭП [1, 2]. При этом диапазон спектральной чувствительности ФЭП перекрывает значения ближнего и среднего ИК излучения (1,2 мкм–10 мкм), а положение «красной» границы чувствительности может смещаться на величину до нескольких (2-4) мкм.

Несмотря на простоту конструкции фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, на их основе можно построить ряд многофункциональных одноэлементных сенсоров, чувствительных как к нескольким параметрам оптического излучения, так и к другим воздействующим факторам [2].

Например, наличие в структуре ФЭП встречно включенных барьерных структур может привести к появлению на спектральной характеристике чувствительности области с инверсией знака фото-ЭДС [6, 11, 12]. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров  $I$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $\Delta z$  дает возможность функционального выражения одной физической величины через другую (или совокупность нескольких величин) и использования прибора в качестве фотоприемника для сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения и др., приема и передачи информации, координатно-чувствительного элемента [2].

Структура многофункционального датчика, используемого в составе измерительных преобразователей систем оптической диагностики, может включать совокупность одного или нескольких конструктивно объединенных чувствительных элементов, размещенных в зоне

действия нескольких физических величин, а также формирующих соответствующие сигналы по средством преобразовательных (передаточных) функций. Фотоприемники на основе полупроводниковых структур с многозарядной примесью характеризуются свойствами управляемости своих параметров (энергетической характеристикой, спектральной характеристикой чувствительности, быстродействием и др.) под действием внешних и внутренних факторов, в первую очередь дополнительного освещения.

#### Литература

1. Vorobey R.I., Gusev O.K., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Svistun A.I., Shadurskaya L.I., Yarzhebtskaya N.V., Kierczynski K. // Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. // Przegląd elektrotechniczny, Nr 5/2014. – Pp. 75–78.
2. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Гусев, О.К. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О.К. Гусев, А.И. Свистун, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Датчики и системы. – 2011, № 1. – С. 19–23.

УДК 614.842

### К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ И ЦЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ И ОХРАНЫ ОБЪЕКТОВ

Мисюкевич Н.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

При составлении технического задания на проектируемую систему ее назначение и цели формулируются в разделе «Общие сведения» или отдельном разделе. Обязательные для применения требования к техническому заданию по системам противопожарной защиты изложены в ТКП 340-2011 [1], а по системам охраны в РД 28/3.008-2001 [2]. Подробное содержание разделов технического задания содержится в межгосударственном стандарте ГОСТ 34.602-89\* [3].

ГОСТ 12.1.004-91\* [4] установлено, что пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями. «Система пожарной автоматики – совокупность взаимодействующих систем пожарной сигнализации, передачи извещений о пожаре, оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, противодымной вентиляции, установок автома-

тического пожаротушения и иного оборудования автоматической противопожарной защиты, предназначенных для обеспечения пожарной безопасности объекта [5].

Для обеспечения пожарной безопасности объекта следует выполнить одну из задач [4]:

- исключить возникновение пожара;
- обеспечить пожарную безопасность людей;
- обеспечить пожарную безопасность материальных ценностей;
- обеспечить пожарную безопасность людей и материальных ценностей одновременно.

Вступающий в силу с 01.01.2020 технический регламент ТР ЕАЭС 043/2017 [5] определил, что система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) – совокупность технических средств, предназначенных для информирования людей о возникновении пожара, необходимости эвакуироваться, путях и очеред-

ности эвакуации. Таким образом, можно утверждать, что не может существовать систем оповещения без решения задач управления эвакуацией людей при пожаре. Введенный в действие 01.09.2018 технический кодекс установившейся практики ТКП 45-02-317-2018 [6], к сожалению, использует старый термин и определение системы: «Система оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией – совокупность технических средств, предназначенных для сообщения людям информации о возникновении пожара или другой чрезвычайной ситуации и порядке действий при эвакуации».

Назначение систем прослеживается из определения их терминов в ТНПА. В частности, для систем противопожарной защиты определены даны в ТР ЕАЭС 043/2017 [5].

Система передачи извещений о пожаре (СПИ) – совокупность технических средств, предназначенных для передачи по каналам связи и приема в пункте централизованного наблюдения или в помещении с персоналом, ведущим круглосуточное дежурство, извещений о пожаре на объекте (объектах), служебных и контрольно-диагностических извещений, а также (при наличии обратного канала связи) для передачи и приема команд телеуправления;

Система пожарной сигнализации (СПС) – совокупность взаимодействующих технических средств, предназначенных для обнаружения пожара, формирования, сбора, обработки, регистрации и передачи в заданном виде сигналов о пожаре, режимах работы системы, другой информации и выдачи (при необходимости) сигналов на управление техническими средствами противопожарной защиты, технологическим, электротехническим и другим оборудованием;

Система противодымной вентиляции – совокупность взаимодействующих технических средств, предназначенных для предотвращения или ограничения опасности задымления зданий и сооружений при пожаре, а также воздействия опасных факторов пожара на людей и материальные ценности.

Согласно закону [7] системы охраны объектов предназначены для охраны от противоправных посягательств, в том числе от незаконных проникновений на них. Охрана объектов представляет совокупность правовых, организационных, охранных, режимных и технических мер [8].

Назначение системы конкретизируется в зависимости от объекта, на котором она применяется.

Основной принцип, который должен соблюдаться при проектировании и монтаже систем охранной сигнализации, состоит в обязательном приоритетном оснащении техническими средствами охранной сигнализации всех уязвимых мест объекта [9]. Они должны использоваться только в комплексе с инженерно-техническими

средствами охраны, обеспечивающими противодействие несанкционированному доступу. Отдельные уязвимости могут блокироваться системами охранными телевизионными и (или) системами контроля и управления доступом, которые не образуют дополнительного рубежа охранной сигнализации.

Системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре должны обеспечивать реализацию разработанных планов эвакуации в целом по всему зданию (сооружению), а при необходимости – последовательно или выборочно в отдельных его частях (этаж, секция и т. п.).

Системы противодымной вентиляции должны обеспечивать коллективную безопасность людей на время эвакуации из зданий повышенной этажности.

Системы пожарной сигнализации должны обеспечить возможность ограничения пожара в пределах одного помещения силами и средствами активной противопожарной защиты.

Автоматические установки пожаротушения должны обеспечивать локализацию и ликвидацию пожара на ранней стадии при его возникновении.

Назначение любой системы безопасности – обеспечение возможности своевременного успешного реагирования при отсеивании ложных причин. Можно выделить три составные части, направленные на достижение успеха: обнаружение опасности; оценка и принятие решения; реагирование.

Значение термина «назначение» тесно связано с синонимами данного понятия: предназначение, функция, миссия, роль. Система противопожарной защиты предназначена для удовлетворения потребности объекта в обеспечении пожарной безопасности; система охраны предназначена для сохранения объекта охраны.

Согласно ГОСТ 34.602-89 [3] в подразделе «Цели создания системы» технического задания приводят наименования и требуемые значения технических, технологических, производственно-экономических или других показателей, которые должны быть достигнуты в результате создания системы, и указывают критерии оценки достижения целей создания системы. Таким образом, цели должны характеризоваться показателями назначения. Они должны быть конкретными, измеряемыми, достижимыми. Следует использовать ТНПА, определяющие показатели назначения систем и технических средств на разных стадиях жизненного цикла.

Цели формулируются с учетом назначения технической системы и необходимости выполнения одной из задач системы пожарной безопасности (для систем противопожарной защиты) или задач сохранения жизни, здоровья, наследственности, имущества, окружающей среды (для си-

стем охраны). Цели формулируются исходя из функционального назначения отдельных составных частей системы. Формулировка целей отвечает на вопрос: «чего необходимо достичь?».

При проектировании должна быть проведена оценка риска. Определение и оценка рисков проводятся с учетом ТНПА, регламентирующих допустимые уровни и правила определения и расчета рисков.

### Литература

1. Установки пожаротушения автоматические. Системы пожарной сигнализации. Порядок разработки задания на проектирование: ТКП 340-2011. – Введ. 01.01.2012.

2. Технические средства и системы охраны. Порядок разработки технического задания на проектирование: РД 28/3.008-2001. – Введ. 01.01.2002. – Минск: МВД Беларуси, 2001. – 21 с.

3. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизиро-

ванной системы: ГОСТ 34.602-89\*. – Введ. 01.01.1990 / Нац. фонд ТНПА.

4. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – Минск: Госстандарт, 2008. – 65 с.

5. О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения: ТР ЕАЭС 043/2017. – Введ. 01.01.2020.

6. Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования. ТКП-45-2.02-317-2018. – Введ. 01.09.2018.

7. Закон Республики Беларусь от 8 ноября 2006 года № 175-З «Об охранной деятельности в Республике Беларусь».

8. Охрана объектов и физических лиц. Термины и определения. СТБ 1250-2000. – Введ. 01.04.2001.

9. Технические средства и системы охраны. Тактика применения технических средств охранной сигнализации: РД 28/3.006-2005. – Введ. 01.01.2002. – Минск: МВД Беларуси, 2005. – 51 с.

УДК 620.18:621.7-4

## ПРОВЕДЕНИЕ СУБЪЕКТИВНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ КАЧЕСТВА ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Бобрикович А.А., Гусев О.К., Воробей Р.И.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Процедура тестирования звуковоспроизводящей аппаратуры включает в себя несколько важнейших факторов. Согласно рекомендациям AES-20-1996 в тестовой программе следует использовать цифровые записи, так как они сохраняют свои характеристики во времени и поддаются точному копированию на требуемые носители. Программное обеспечение должно позволять максимально полно идентифицировать пространственные и тембральные характеристики звучания. Тестовая программа должна включать в себя записи различных инструментов и их комбинаций.

Также для базового контроля испытуемой звуковоспроизводящей аппаратуры, установок баланса и уровня громкости следует использовать технические сигналы: скользящий тон и розовый шум.

Количество экспертов должно быть не менее 6 человек. В качестве экспертов привлекаются опытные тестировщики с проверенным слухом. Дифференциальный порог слуха к изменению уровня сигнала на частоте 1000 Гц должен быть не более 3 дБ. Экспертам при прослушивании необходимо меняться местами, чтобы проверить воспринимаемый слуховой эффект на оси симметрии стереосистем. Если тестируемая звуковоспроизводящая система состоит из нескольких громкоговорителей, то ее следует протести-

ровать с различных позиций. Эксперт должен осуществлять прослушивание не более двух часов в день, с непрерывной работой не более 20 минут с длительностью перерыва, равного времени прослушивания. Контроль производится с помощью метода предпочтительности. Эксперты последовательно оценивают один и тот же отрывок записи, воспроизводимый через эталонный и испытуемый тракты. Записи в паре предоставляются экспертам в случайной последовательности при сравнении двух систем, причем одна из систем может изменять свои характеристики в режиме реального времени с помощью метода комплексного статистического контроля аудиоаппаратуры. При воспроизведении ряда записей в тракт звукопередачи вводят искажения одного типа но разной величины. Эксперты должны оценить тайминг, величину и уровень искажений.

Прослушивание должно проводиться вслепую с помощью акустически прозрачного экрана, влияние которого не должно приводить к изменениям частотной характеристики тестируемых систем более чем на 1 дБ. Длительность прослушивания фонограмм должна составлять 30...50 с (AES-20-1996) или 20-40с (МЭК 218-В) с перерывами в 2 секунды. Переход на другой тестируемый образец должен происходить с интервалом в 15 секунд.

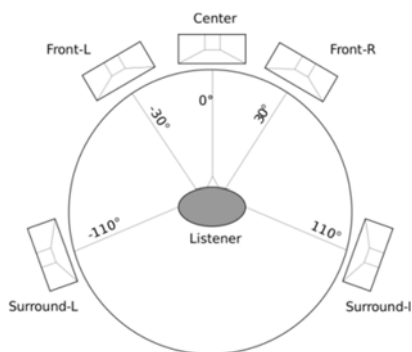


Рисунок 1 – Расположение акустических систем в помещении прослушивания для систем Surround Sound

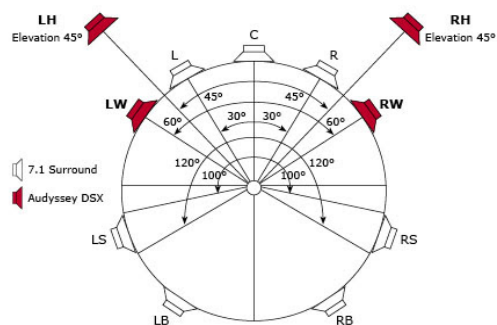


Рисунок 2 – Рекомендации AES-20-1996 по контролю качества звуковоспроизводящих систем класса 11.1 Surround Sound

Уровни громкости прослушиваемых фонограмм оказывают существенное влияние на результаты экспертизы. Уровень громкости воспроизводимого сигнала должен быть близок к громкости оригинального источника, но эти условия не всегда могут быть выполнены. Поэтому в зависимости от вида фонограммы используется несколько уровней, которые выбираются ступенчато через 10дБ. Требуемый уровень устанавливается шумомером с помощью розового шума. При парном сравнении уровень громкости испытуемой системы и эталонной выравнивается на слух по указанию экспертов. Во время тестирования многоканальной системы уровни громкости всех входящих в нее громкоговорителей выстраиваются тем же методом.

Результаты субъективно-статистических экспертиз зависят от следующих важнейших параметров: перечень тестовых программ, отбор и уровень экспертов, метод выбора шкал и оценок обработки результатов, требования к источникам фонограмм, параметры помещения для прослушивания. С целью повышения достоверности результатов, возможности их воспроизведения в различных международных организациях IEC (Международный электротехнический комитет, МЭК), AES (Общество аудиоинженеров), ISO, ITU и других создаются специальные группы исследователей, которые занимаются разработкой рекомендаций по ор-

ганизации субъективно-статистических экспертиз, требований к параметрам помещений и аппаратуры, а также методиками отбора экспертов и способами обработки результатов. На основе этих рекомендаций разрабатываются международные стандарты для производителей звуковоспроизводящей аппаратуры [1].

Основными документами, используемыми при организации субъективно-статистических экспертиз являются ОСТ 4.202.003-84 «Метод экспертной оценки качества звучания, IEC 268-5, Part-B Sound System Equipments «Listening tests on loudspeakers» и « AES recommended practice for professional audio-Subjective evaluation of loudspeakers». Они определяют требования к помещению, порядку отбора и размещения образцов оборудования и экспертов; требования к параметрам звуковоспроизводящего тракта; к процедуре тестирования, выбору звукового материала, методам оценки, порядку прослушивания, интерпритации полученных результатов; к видам оценочных таблиц и способам обработки результатов [2].

Приведенные рекомендации относятся к профессиональным, бытовым и выносным звуковоспроизводящим системам. В рекомендациях AES-20-1996 отмечено, что они не распространяются на акустические системы для рабочих станций ЭВМ, а также, что для студийных мониторов должны дополнительно учитываться требования стандартов EBU (Европейского радиовещательного союза).

Некоторые из приведенных рекомендаций нуждаются в доработке в связи с общей мировой тенденцией повышения качества звучания звуковоспроизводящих концертных и студийных систем, а также для обеспечения производителями корреляции между стоимостью и уровнем качества звуковоспроизводящих систем.

Одним из основных приоритетов в этом направлении является внедрение «Метода комплексного статистического контроля качества аудиоаппаратуры» в основные методики контроля качества. Это позволит осуществлять точный контроль качества с привязкой к слуховому аппарату человека и вывести контроль качества концертных, студийных и бытовых звуковых систем на более высокий уровень.

### Литература

1. Попов О.Б «Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания» / Б. Попов, С.Г. Рихтер. – Москва : Горячая линия – Телеком. – 2007. – С. 294–299.
2. Бобрикович А.А., Гусев О.К. «Соотношение результатов объективного и субъективного контроля качества аудиосигналов» / МНТК «Приборостроение – 2015». Минск. БНТУ. – 2015. – С. 54–55.

УДК 681.2.08

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ

Ахремчук Д.А.<sup>1</sup>, Зданович С.В.<sup>1</sup>, Жуковский П.В.<sup>2</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Кравцевич А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

<sup>3</sup>Гродненский филиал «Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения»

ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси», Гродно, Республика Беларусь

**Введение.** Во многих случаях функциональные свойства композитных материалов обеспечиваются за счет особых характеристик их поверхности. В этой связи особое внимание уделяется новым методам анализа поверхности, среди которых наибольший интерес представляют электрофизические методы на основе зонда Кельвина [1]. Эти методы чувствительны к малым отклонениям электрофизических свойств поверхности материалов, обладают высоким пространственным разрешением и являются полностью бесконтактными.

В результате проведенных ранее исследований [2] предложена методика и проведены измерения пространственного распределения электрофизических свойств поверхности многокомпонентных композитов на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250, содержащих в качестве наполнителя углеродный наноматериал (УНМ), наноразмерный диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), а также матричный ПЭВД при дополнительном воздействии на поверхность оптическим излучением. Для ряда композитов был получен отклик электростатического потенциала (до 60 мВ) на внешнее оптическое воздействие, что позволило получить информацию о значении поверхностной фотоЭДС.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований и оценка влияния на формирование электростатического потенциала и поверхностной фото-ЭДС порошковых смесей проводящих и диэлектрических частиц, используемых ранее в качестве комбинированных наполнителей для композитов.

**Приборы и материалы.** Измерения проводили на сканирующей установке, оснащенной датчиком измерения электростатического потенциала (аналоговый зонд Кельвина [3]) и источником оптического излучения на базе белого светодиода. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 1.

В качестве экспериментальных образцов использованы порошковые смеси УНМ и  $\text{SiO}_2$  марки Т80 с различным соотношением масс, и комбинированные смеси проводящих и диэлектрических частиц после ультразвукового диспергирования (УЗД), таблица 2. Образцы изготовлены в НИЦПР ИТМО НАН Беларуси (Гродно).

Таблица 1 – Технические характеристики сканирующей установки на основе зонда Кельвина

| Наименование параметра                       | Показатель                                          |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Датчик определения потенциала                | Динамический конденсатор по методу Кельвина–Зисмана |
| Диаметр датчика определения потенциала, мм   | 1                                                   |
| Погрешность определения потенциала, мВ       | $\pm 2$                                             |
| Система позиционирования                     | 3-х координатная на базе шаговых двигателей         |
| Точность позиционирования, мкм               | $\pm 5$                                             |
| Пространственное разрешающая способность, мм | 10                                                  |
| Область сканирования, мм                     | 180 x 180                                           |
| Источник оптического излучения               | На базе светоизлучающего диода                      |
| Диапазон длин волн оптического излучения, нм | 400–900                                             |
| Диапазон измерения поверхностной фотоЭДС, мВ | $\pm 2$                                             |
| Погрешность определения фотоЭДС, мВ          | $\pm 2$                                             |

Таблица 2 – Условные обозначения и характеристика порошковых смесей

| УО | Наименование                                                | Соотношение   |
|----|-------------------------------------------------------------|---------------|
| a1 | ПЭВД 122 + УНМ                                              | 94 / 6 % мас. |
| a2 | ПЭВД 122 + $\text{SiO}_2$                                   | 97 / 3 % мас. |
| b1 | Углеродный наноматериал (УНМ)                               | 100 % мас.    |
| b2 | Диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )                          | 100 % мас.    |
| b3 | УНМ + $\text{SiO}_2$                                        | 1 / 2         |
| b4 | УНМ + $\text{SiO}_2$                                        | 1 / 1         |
| b5 | УНМ + $\text{SiO}_2$                                        | 2 / 1         |
| b6 | УНМ + $\text{SiO}_2$ , ультразвуковое диспергирование (УЗД) | 1 / 2         |
| b7 | УНМ + $\text{SiO}_2$ (УЗД)                                  | 1 / 1         |
| b8 | УНМ + $\text{SiO}_2$ (УЗД)                                  | 2 / 1         |

**Результаты.** Характерные результаты исследования параметров распределения электростатического потенциала приведены на рисунке 1, a–в для образцов a1, a2, b5, b8, соответственно. В таблице 3 приведены результаты статистической обработки исследуемых образцов.

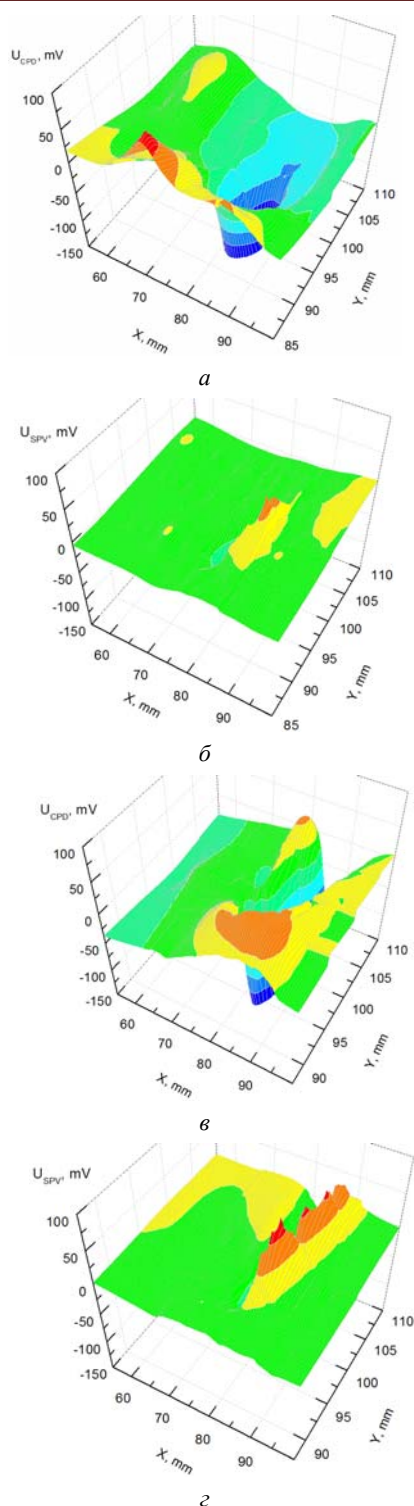


Рисунок 1 – Карты распределения электростатического потенциала (а, б) и поверхностной фотоЭДС (б, з) образцов *a1* (а, б) и *a2* (в, з)

Из оценки параметров распределения электростатического потенциала, и поверхностной фотоЭДС композиционных материалов *a1* и *a2*, следует, что характер распределения потенциала (рис. 1, а и в) и поверхностной фотоЭДС (рис. 1, б и з) близок к характеру распределения матрич-

ных материалов ПЭВД и вторичного ПЭВД [2]. В общем случае, распределение однородно. Относительные значения потенциала составляют  $(-10 \pm 2 \text{ мВ})$  и  $(-30 \pm 2 \text{ мВ})$  для образцов *a1* и *a2*, соответственно, при этом в центральной части образцов, прилегающей к вакуумному прижиму, наблюдаются пиковые значения  $(-250 \text{ мВ})$ . Относительные значения потенциала порошков УНМ и  $\text{SiO}_2$  (образцы *b1* и *b2*) составили  $(-10 \text{ мВ})$  и  $(-8 \text{ мВ})$ , соответственно (табл. 3). В случае смесей (образцы *b3–b5*) относительные значения потенциала возрастают, также существенен вклад УЗД (образцы *b6–b8*).

Таблица 3 – Статистическая оценка результатов измерения

| УО        | Математическое ожидание |                       | Полуширина гистограммы распределения |                       |
|-----------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
|           | $U_{\text{срв}}$ , мВ   | $U_{\text{спв}}$ , мВ | $U_{\text{срв}}$ , мВ                | $U_{\text{спв}}$ , мВ |
| <i>a1</i> | -10                     | -2                    | 10                                   | 4                     |
| <i>a2</i> | -30                     | 0                     | 6                                    | 2                     |
| <i>b1</i> | -10                     | 1                     | 6                                    | 10                    |
| <i>b2</i> | -8                      | -4                    | 10                                   | 10                    |
| <i>b3</i> | -25                     | -4                    | 8                                    | 10                    |
| <i>b4</i> | -98                     | -3                    | 8                                    | 8                     |
| <i>b5</i> | -48                     | -2                    | 8                                    | 10                    |
| <i>b6</i> | -124                    | -2                    | 4                                    | 2                     |
| <i>b7</i> | -106                    | -3                    | 6                                    | 4                     |
| <i>b8</i> | -56                     | -3                    | 6                                    | 4                     |

Для исследуемых композиционных материалов и порошковых смесей изменение электростатического потенциала от воздействия оптического излучением не значительное и сопоставимо с погрешностью средств измерений. Однако для многокомпонентных композитов (ПЭВД+УНМ+ $\text{SiO}_2$ ) эффект фотоЭДС был характерен [2].

### Литература

1. Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Тявловский А.К. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов / Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; Витебский гос. тех. ун-т; ред. В.В. Клубович. – Витебск, 2015. – Т. 1. – 398 с.
2. Пантелеев К.В., Кравцевич А.В., Ровба И.А., Лысенко В.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина // Приборы и методы измерений. 2017; 8 (4): 386–397.
3. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. построение измерителей контактной разности потенциалов // Приборы и методы измерений. 2016; 7 (1): 7–15.



## КОНЦЕПЦИЯ ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПЛАТФОРМ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Гладкий А.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Ряд мобильных устройств, техники, вооружения при подготовке их к эксплуатации, а также в процессе эксплуатации, требуют горизонтирования платформ, на которых они установлены. Система горизонтирования предназначена для проведения прецизионных операций выставки установок платформы, проведения операций подъема, горизонтирования и опускания самоходных пусковых установок, горизонтирования платформ транспортных установок [1].

В процессе работы угол наклона опорной платформы к горизонту должен быть в пределах допустимого диапазона значений наклона. При ручном управлении процесса горизонтирования оператор вынужден останавливать процесс и вручную корректировать положение платформы, что приводит к увеличению время развертывания/свертывания платформы.

Существующие системы горизонтирования опорной платформы выполняют процесс горизонтирования в ручном режиме, устраняя крен сначала в продольном направлении относительно опорного контура, затем в поперечном направлении. При этом не исключены ситуации выдвигания штоков на максимальную длину. Следует отметить, что большинство систем горизонтирования используют в своей работе гидравлические исполнительные устройства, обладающие следующими недостатками:

- зависимость характеристик от условий эксплуатации;
- чувствительность к загрязнению рабочей жидкости и необходимости достаточно высокой культуры обслуживания.

Решение задачи горизонтирования складывается из решения следующих подзадач:

- обеспечение требуемой точности выравнивания несущего основания;
- обеспечение требуемой оперативности процесса горизонтирования;
- сохранение максимально устойчивого положения после горизонтирования;
- распределение нагрузки на опоры.

Реализация настоящей концепции горизонтирования платформ на современной элементной базе позволяет выполнять как в автоматическом, так и в ручном режимах вывешивание платформы на выносных электромеханических цилиндрах и последующее горизонтирование. При этом предотвращаются ситуации отрыва опор от грунта [2].

Электроцилиндры конструктивно выполнены на базе механической планетарной роликвинто-

вой передачи, преобразующей вращательное движение в поступательное, которая интегрирована непосредственно в ротор сервомотора с постоянными магнитами. Сервомотор оснащается датчиками обратной связи, которые используются для линейного позиционирования. Обмотки статора электромотора выполнены по специальной технологии T-LAM, ламинированные сегменты которых не имеют лобовых частей, что увеличивает крутящий момент и уменьшает габариты. Обмотки залиты специальным компаундом и впрессованы в корпус электроцилиндра. Это обеспечивает полную герметичность и нечувствительность к окружающей среде. Следуют отметить дополнительные достоинства привода:

- обеспечение стабильной скорости работы;
- точное позиционирование и плавное регулирование;
- требуют минимальное техническое обслуживание;

Алгоритм горизонтирования платформы основан на применении системы координат, привязанной к диагоналям основания платформы (рисунок 1).

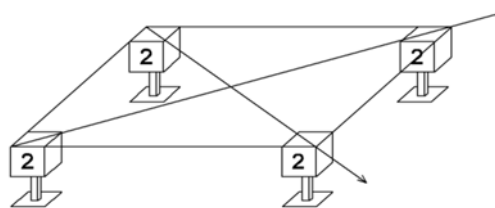


Рисунок 1 – Схема расположения электроцилиндров

Весь процесс горизонтирования разделён на выполнение двух задач: вывешивание и непосредственно горизонтирование.

Процедура вывешивания проводится, чтобы обеспечить касание всеми опорами аутригеров поверхности. Для этого каждый домкрат оснащен концевым выключателем на аутригере. Как только концевой выключатель срабатывает – опора аутригера коснулась поверхности. В конструкции аутригеров установлены датчики, определяющие число оборотов в винтовой системе, и тем самым определяющие расстояние выдвигания аутригеров. Если датчик не сработал, поступает информация на пульт дистанционного управления, что расстояние вывешивания превышено.

Осями координат будут являться прямые, проходящие через расположенные на концах одной диагонали электроцилиндры. Это позволит обеспечить независимое регулирование по двум диагоналям. Таким образом, гарантируется возможность одновременной работы всех четырех

электроцилиндров. Электроцилиндры, расположенные на концах одной диагонали объединяются в пары и работают одновременно. От инклинометра поступает информация о текущем отклонении основания по продольной и поперечной осям, относительно горизонта. На основании этих данных рассчитывается отклонение по осям диагоналей, исходя из чего, определяется направление вращения для каждого электродвигателя. Для каждой пары электроцилиндров, направление вращения двигателей будет противоположным. Таким образом, первый двигатель поднимает, второй опускает. Это ускоряет процесс горизонтирования. После того, как направления вращения заданы, на электродвигатели подается импульс с заранее заданной продолжительностью. После чего происходит повторный опрос инклинометра. Вся процедура повторяется до тех пор, пока показания инклинометра не будут в пределах заданного допуска. На этом процедура горизонтирования считается завершенной.

Пульт дистанционного управления предназначен для беспроводного подключения и управления выносными исполнительными устройствами – электроцилиндрами, отображения текущей информации о положении платформы, предупреждения при аварийных ситуациях.

Включение и отключение системы производится как блоком управления, так и пультом дистанционного управления. Возможности пульта дистанционного управления расширены по сравнению с блоком управления. Блок управления является дублирующим органом при выходе пульта дистанционного управления из строя.

Корпус устройства изготавливается из ударопрочного пластика.

Пульт дистанционного управления покрыт специальным лакокрасочным покрытием – soft-touch, что позволяет защитить устройство от механических воздействий, улучшить амортизирующие свойства самого материала и удобство эксплуатации.

В области систем горизонтирования приняты следующие конструкторские и технические решения: использование электропривода, беспроводное соединение между пультом дистанционного управления и блоком управления системы горизонтирования, автоматический и ручной режимы работы.



Рисунок 2 – Пульт дистанционного управления

Таким образом, разработанная концепция горизонтирования обладает следующими преимуществами:

- автоматический и ручной режимы горизонтирования;
- точность горизонтирования – плюс-минус три градуса;
- статическая ошибка горизонтирования по сигналам датчика углов наклона в двух взаимно перпендикулярных плоскостях продольной (тангаж) и поперечной (крен) – не более  $\pm 30'$ ;
- беспроводной пульт дистанционного управления;
- полная разгрузка подвески шасси при вывешивании;
- общее время режима упора в грунт и режима автоматического горизонтирования, включая время грубого и точного горизонтирования, при максимальных углах наклона рабочей площадки – не более четырех минут;
- температура эксплуатации – от минус 40 до плюс 50°C.

### Литература

1. Щербаков, В.С. Автоматизация проектирования устройств управления положением платформы строительной машины : монография / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, М.Г. Григорьев. – Омск : СибАДИ, 2011. – 119 с.
2. Святун, Р.А. Автоматическая система горизонтирования для размещения высокоточного оборудования / Р.А. Святун, В.А. Резников // Системный анализ и управление организационными и техническими объектами: материалы V Всеукраинской НТК студентов, аспирантов и молодых ученых. – Донецк, 2014. – С. 559–563.

УДК 681.2.082:531.45

## ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ

Джилавдари И.З.<sup>1</sup>, Мекид С.Н.<sup>2</sup>, Ризноокая Н.Н.<sup>1</sup>, Касьмин В.Ю.<sup>1</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Университет нефти и минералов короля Фадха, Дхахран, Саудовская Аравия

Одной из задач современного приборостроения является обеспечение точного позиционирования подвижных элементов приборов. Как правило, этого можно добиться путем использования автоматических систем обратных связей (СОС), содержащих датчики положения и исполнительные механизмы управления. Работа СОС учитывает связь «перемещение – сила сопротивления движению (или сила трения)», которая устанавливается теоретически или опытным путем. Именно закономерности связи «перемещение – сила сопротивления движению» в самом начале движения и при реверсе движения ограничивают точность позиционирования твердых тел, поскольку они имеют сложный характер и, как правило, неизвестны [1]. Участки начала движения тел и реверса называют предварительным смещением [1]. Особую роль эти участки играют при трении качения, поскольку измерение и изучение закономерностей данного вида трения представляют трудную проблему, вследствие сложности механизмов трения качения и малой величины силы сопротивления качению.

Ранее авторами данного исследования было установлено, что сопротивление качению при контакте твердых гладких твердых тел в области предварительного смещения определяется, главным образом, силами контактной адгезии этих тел. Эти силы включают силы, связанные с диссипацией энергии катящегося тела, и дополнительные силы упругости, не связанные непосредственно с упругой деформацией тел [2].

Также, силы контактной адгезии играют важную роль в приборах, построенных с помощью МЕМС – технологий, поскольку при уменьшении размеров подвижных тел роль сил контактного взаимодействия их поверхностей возрастает, что приводит к эффектам слипания. Поэтому исследование сил контактной адгезии путем изучения сил сопротивления качению могут помочь решению также и этой важной проблемы.

Среди известных методов измерения сил трения качения стандартизированным является маятниковый метод, описанный в [3]. Данный метод основан на наблюдении затухания амплитуд свободных качаний физического маятника, который опирается двумя твердыми шариками на плоскую поверхность второго твердого тела. Однако, по ряду причин непосредственно, технически и методически, данный метод не может быть использован для измерений в режиме предварительных смещений.

Авторами данной работы был предложен метод и устройство для исследования сил сопротивления качению в области предварительного смещения с более высокими точностью и чувствительностью. В этом методе также используется маятник, аналогичный маятнику, описанному в [3]. В нем измеряют зависимости амплитуды свободных качаний маятника от времени и зависимости периодов этих качаний от амплитуды [2]. Однако использование маятника с опорой на два шарика является существенным недостатком, поскольку это требует использования двух идентичных шариков и идентичных плоских образцов, на которые они опираются, или образцов с размерами поверхности, больших расстояния между шариками. Выполнение этих требований не всегда выполнимо.

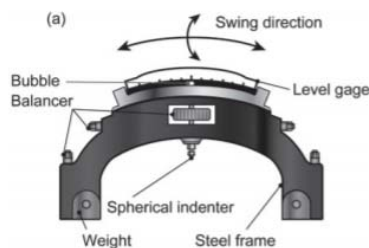


Рисунок 1 – Первичная конструкция маятника Герберта для измерения твердости [4]

Оптимальным вариантом физического маятника является устройство, в котором в качестве опоры используется один шарик. В этом случае требования к шарикам и плоскому исследуемому образцу существенно облегчаются – достаточно иметь образец с размерами, большими диаметра пятна контакта шарика и поверхности.

Следует отметить, что маятник с опорой на один шарик был предложен в 20-х годах прошлого века Гербертом [4]. Это устройство использовалось исключительно для измерения твердости поверхности материалов, на которые опирался шарик. Шарик имел диаметр около 1 мм, и он находился под нагрузками, при которых деформации опорной поверхности имели пластический характер. Начальные амплитуды качаний маятника, составляли десятки градусов.

В разрабатываемом авторами устройстве предполагается, что нагрузки должны находиться в области упругих деформаций, контактирующих тел. Только в этом случае можно говорить, что сопротивление качению в области предварительных смещений определяются, в основном, именно силами адгезии, действующими между поверхностями тел, находящихся в контакте.

Данное требование определяет максимальную нагрузку на шарик и радиус шарика.

Однако, очевидно, что, в общем случае, подобная конструкция не может совершать качания лишь в одной плоскости. При отклонении маятника, который опирается на плоскую поверхность лишь одним шариком, от положения равновесия, в нем возбуждаются качания одновременно вокруг двух взаимно перпендикулярных горизонтальных осей и одновременно возбуждается вращение вокруг вертикальной оси. Нашей задачей явилась поиск конструкции маятника и режимов измерений, при которых маятник будет совершать устойчивые качания вокруг лишь одной горизонтальной оси.

Опыт показал, что, такой маятник должен иметь форму, при которой его главные моменты инерции относительно горизонтальных осей значительно отличаются между собой. В этом случае частоты свободных качаний маятника вокруг этих осей также значительно отличаются между собой. Вращения такого маятника вокруг вертикальной оси не возникают вовсе, если в начальный момент маятник не испытывает соответствующих толчков. Существенным оказалось то, что интенсивности затухания указанных качаний также отличаются: качания с большей частотой затухают быстрее, чем качания с меньшей частотой. Данный эффект выражен тем сильнее, чем больше отличаются частоты качаний и чем меньше амплитуды качаний.

Конструкция маятника, разработанная с учетом указанных условий и обеспечивающая его устойчивые качания вокруг одной горизонтальной оси, показана на рисунке 2. При амплитудах качаний  $\approx 10$  градусов отношение периодов качаний относительно центральных главных осей инерции в данной конструкции оказалась равным, примерно, 12,0/2,3. При начальной амплитуде  $\approx 12$  угловых минут данный маятник совершает устойчивые качания вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости рисунка. При данной амплитуде колебаний длинный период качаний был около 6 с, что отличается вдвое по сравнению с указанными выше 12 с. Этот результат согласуется с установленным авторами ранее эффектом резкого уменьшения периода качаний при уменьшении амплитуды колебаний, который они связывают с упругой составляющей сил контактной адгезии, в соответствии с теорией, разработанной авторами в [2].

В своем окончательном виде в измерительном устройстве предполагается, что амплитуда колебаний маятника будет измеряться с помощью луча лазера, отраженного от плоского зеркала, закрепленного горизонтально на его верхней поверхности, и попадающего на матрицу web-камеры, закрепленной неподвижно, формируя соответствующий электрический сигнал. В этом устройстве будут непрерывно записываться угловые смещения маятника в процессе его качаний от времени. Полученная при этом информация позволит измерять значения диссипативной и упругой составляющих силы контактной адгезии между поверхностями шарика и плоской поверхности, на которую опирается шарик в соответствии с теорией, построенной в [2].



Рисунок 2 – Маятник с опорой на один шарик

Максимальная длина маятника выбрана около 44 см, диаметр шарика – 12,5 мм, масса маятника – около 0,75 кг, центр масс маятника находится вблизи пятна контакта шарика и опорной поверхности

### Литература

1. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S Mekid // Proc. Instn Mech. Engrs Part J : J. Engineering Tribology. – Vol. 218 – P. 305–311.
2. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology. – 2013. – Vol. 227. – № 6. – P. 618–628.
3. ГОСТ 27640-88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения. – Введен: 01.06.1988. – М. : Госкомитет по стандартам, 1988. – 22 с.
4. Suzuki, R. Hardness measurement for metals using lightweight Herbert pendulum hardness tester with cylindrical indenter / R. Suzuki, T. Kaburagi, M. Matsubara, T. Tashiro, T. Koyama // Experimental Techniques. – 2016. – Vol. 40. – Issue 2. – P. 795–802.

УДК 621.382

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Мухуров Н.И.<sup>2</sup>, Опеляк М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Сканирующие измерения пространственного распределения потенциала поверхности диэлектриков отличаются от измерений пространственного распределения контактной разности потенциалов проводящих поверхностей не только большей величиной регистрируемых потенциалов, но и характером их распределения, что подтверждается результатами теоретического моделирования и экспериментальных исследований. Заряд дефекта поверхности диэлектрика, как правило, не сосредоточен в одной точке пространства, а нормально распределен в некоторой окрестности дефекта, т. е. не является локальным. Площадь распределения заряда при этом значительно превышает площадь чувствительной поверхности электрометрического зонда, что делает применение ранее разработанной модели для зонда конечных ненулевых размеров и набора точечных дефектов [1] некорректным для данного случая. Напротив, при моделировании методики измерений пространственного распределения потенциала поверхности диэлектрических материалов электрометрический зонд следует рассматривать как точечный объект, а заряд дефекта на поверхности диэлектрика – как распределенный.

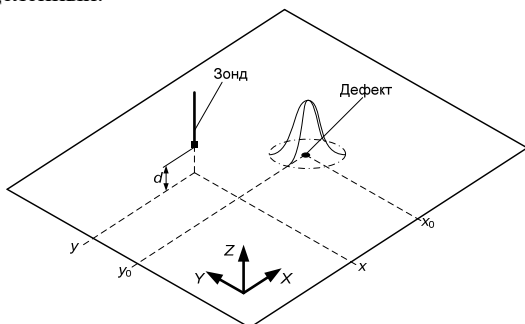


Рисунок 1 – Схема измерений пространственного распределения потенциала поверхности диэлектрических материалов сканирующим электрометрическим зондом

В большинстве практических случаев распределение заряда в окрестности дефекта на поверхности диэлектрика близко к нормальному. Это позволяет описать данное распределение двумерным законом Гаусса:

$$q(x_1, y_1) = \frac{q_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x_1-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y_1-y_0)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

где  $q_0$  – максимальное значение заряда на дефекте;  $x_0, y_0$  – математическое ожидание (коор-

динаты центра) местоположения дефекта;  $\sigma_x, \sigma_y$  – средние квадратические отклонения по координатным осям X и Y, соответственно.

Электрометрический зонд в процессе измерений в режиме сканирования перемещается по координатам X и Y на некотором расстоянии  $d$  от поверхности образца, составляющем зазор зонд-образец (рисунок 1). В процессе сканирования расстояние  $l$  между зондом, находящимся в точке  $(x, y)$  и зарядом, находящимся в точке  $(x_1, y_1)$  изменяется по закону

$$l(x, y) = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + d^2}. \quad (2)$$

Заряд  $q(x_1, y_1)$ , расположенный на расстоянии  $l$  от зонда, наводит на поверхности последнего заряд противоположного знака. Плотность данного наведенного заряда может быть определена по правилу изображений [2] как

$$\rho(x, y, x_1, y_1) = -\frac{q(x_1, y_1)d}{2\pi(l^2(x, y) + d^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

Полную плотность наведенного на чувствительной поверхности зонда заряда, с учетом распределенного характера заряда дефекта, можно рассчитать путем интегрирования как

$$\Theta(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (4)$$

где  $q_0$  – максимальное значение заряда на дефекте;  $x_0, y_0$  – математическое ожидание (координаты центра) местоположения дефекта;  $\sigma_x, \sigma_y$  – средние квадратические отклонения по координатным осям X и Y, соответственно.

Регистрируемое значение электрического потенциала поверхности диэлектрика при этом составит

$$U_{CPD}(x, y) = \frac{\Theta(x, y)S_{probe}}{C_{probe}}, \quad (5)$$

где  $S_{probe}$  – площадь чувствительной поверхности зонда;  $C_{probe}$  – электрическая емкость зонда относительно поверхности образца.

Для численного моделирования использовалась программная среда (САМ-система) MathCad 14. Для упрощения вычислений центр координат был совмещен с центром распределения заряда (местом расположения моделируемого дефекта). Моделировались два наиболее типичных для реальных поверхностей случая:

1) Осесимметричное распределение заряда дефекта ( $\sigma_x = \sigma_y$ ).

2) Вытянутое (протяженное) эллиптическое распределение с соотношением полуосей  $\sigma_x:\sigma_y = 1:3$ .

Целью моделирования являлся поиск оптимального соотношения зазора зонд-образец и шага двухкоординатного сканирования, обеспечивающего максимальную достоверность измерений (т. е. соответствие регистрируемого распределения сигнала электрометрического зонда в процессе сканирования реальному распределению потенциала поверхности диэлектрических материалов). Для этого численно моделировалось перемещение зонда над поверхностью образца с малым шагом ( $\Delta x = \Delta y = 0,01\sigma_x$ ) с различными установками зазора зонд-образец в пределах от  $0,1\sigma_x$  до  $3\sigma_x$ . Результаты моделирования представлялись в виде трехмерных графиков пространственного распределения сигнала электрометрического зонда в процессе сканирования (рисунки 2 и 3).

Видно, что при малых (относительно размеров дефекта) размерах электрометрического зонда величина зазора зонд-образец в пределах  $0,3\sigma_x \dots 3\sigma_x$  не оказывает существенного влияния на пространственное разрешение сканирования, поскольку границы распределения регистрируемых значений потенциала в целом совпадают с границами распределения заряда. Следует отметить, что при установке в модели минимальной величины зазора  $d = 0,1\sigma_x$  распределение сигнала принимает практически равномерный характер без четко выраженных границ, что является неприемлемым с точки зрения методики измерений. Увеличение зазора с  $d = 0,3\sigma_x$  до  $d = 3\sigma_x$  приводит к более острому распределению регистрируемых значений потенциала, при этом интенсивность максимума сигнала падает приблизительно в 3 раза на этом диапазоне значений зазора (с 0,9 В до 0,33 В).

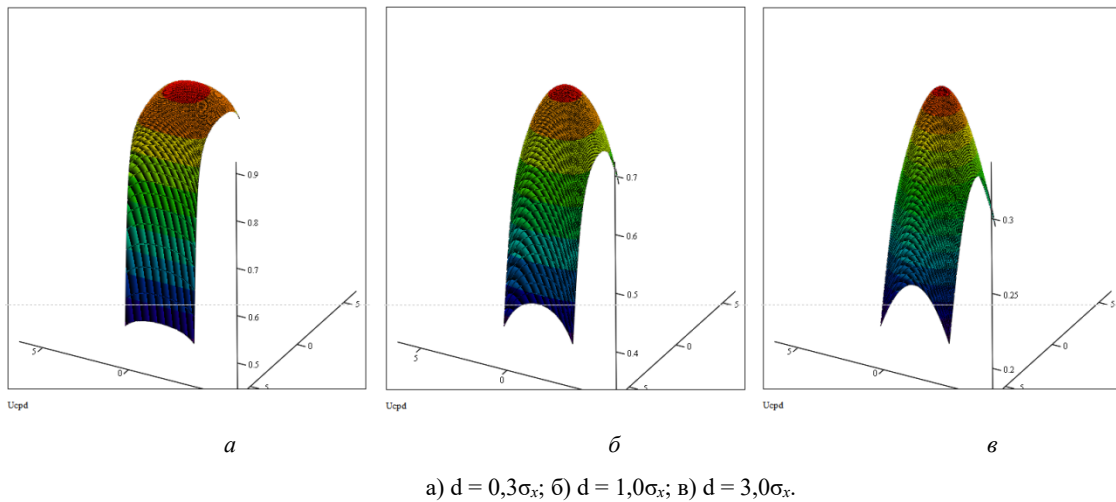


Рисунок 2 – Результат моделирования отклика электрометрического зонда при сканировании поверхности диэлектрика с осесимметричным дефектом

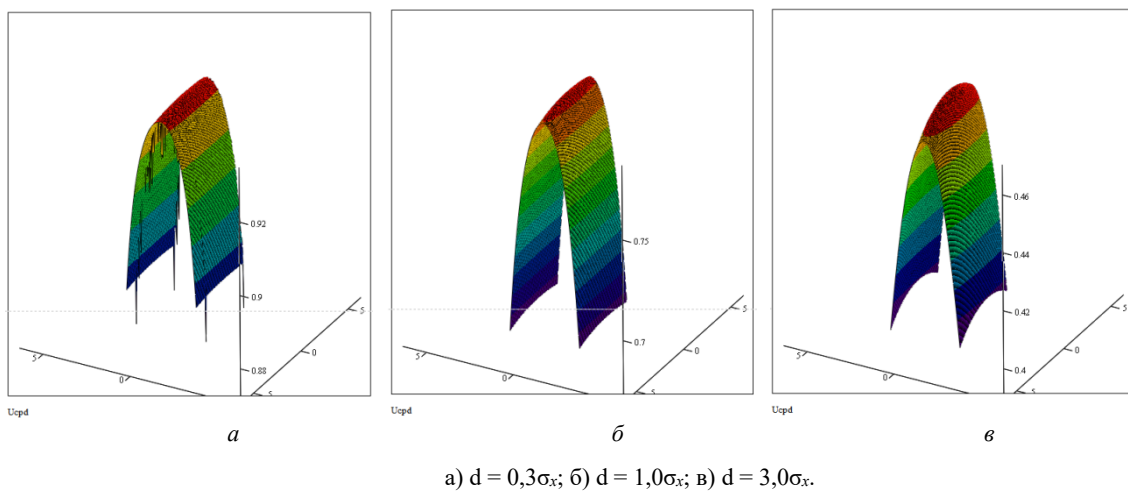


Рисунок 3 – Результат моделирования отклика электрометрического зонда при сканировании поверхности диэлектрика с дефектом вытянутой формы

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДИОДОВ

Сопряков В.И., Шлеведа Ю.В.

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Введение примесей и дефектов для задания свойств полупроводниковых приборов имеет в технологии важнейшее значение, однако их применение может приводить к отрицательным результатам. Известно, что время восстановления обратного сопротивления ( $\tau_B$ ) импульсных диодов зависит от таких факторов, как площадь р-п-перехода, толщина и удельное сопротивление базовой области, концентрация мелкой и глубокой примеси, а также технологии изготовления, определяющей наличие структурных дефектов. Известно также, что  $\tau_B$  импульсных диодов можно уменьшить путем введения в исходный материал или диодную структуру на стадии изготовления примесей с глубокими уровнями.

Введение глубоких примесей может вызывать, однако, и отрицательные последствия, поскольку они приводят к возрастанию удельного сопротивления материала и существенному увеличению его неоднородности вследствие возникновения флуктуаций краев валентной зоны и зоны проводимости. Перечисленные факторы показывают, что дефектно-примесная технология является процессом тонким и требующим детального контроля физических процессов.

В работе исследовалось влияние температуры диффузии на концентрацию электрически активного золота в эпитаксиальном кремнии п-типа, используемом в производстве импульсных диодов. Эпитаксиальный слой, легированный бором, толщиной 18 мкм ( $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), был выращен на подложке, легированной сурьмой, толщиной 280 мкм ( $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).

$P^+$ -п-переходы изготавливались диффузией бора. Введение золота проводилось после создания перехода диффузией из слоя, напыленного на тыловую сторону пластины, в течение одного часа при температурах 950, 1000 и 1050 °С. В качестве контактов напылялся слой алюминия. Для всех температур время диффузии было достаточным для установления равномерного распределения по глубине пластины. На полученных пластинах скрайбировались кристаллы площадью 4 мм<sup>2</sup>.

Концентрация примеси золота ( $N_{Au}$ ) определялась емкостным методом на основании данных измерения концентрации акцепторного уровня  $E_c - 0,55 \text{ эВ}$ . Измерялись статические вольт-фарадные характеристики при температуре жидкого азота ( $T = 77 \text{ К}$ ) после заполнения уровня электронами и после его ионизации. Разность концентраций ионизованных примесей, рассчитываемых из наклона вольт-фарадных характе-

ристик, равна концентрации золота. Таким образом были определены  $N_{Au} = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для температуры диффузии золота 950 °С и  $N_{Au} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для 1000 °С.

Емкость  $p^+$ - $n$ -структур, полученных при температуре диффузии золота 1050 °С, при  $T = 77 \text{ К}$  практически не зависела от обратного напряжения, что свидетельствовало о значительной компенсации базовой области. Моделирование эквивалентной схемы диода позволило оценить удельное сопротивление базовой области  $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и  $N_{Au} = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

График зависимости концентрации электрически активного золота от температуры его диффузии представляет в полулогарифмическом масштабе прямую линию.

Для оценки влияния примеси золота на динамические характеристики исследовались тест-структуры, описанные выше, а также структуры с малой площадью, изготовленные эпитаксиально-планарной технологией с режимом диффузии золота при 1050 °С.

Измерялось время восстановления обратного сопротивления после переключения от прямого тока к обратному или заряд переключения

$$Q_n = \int_0^{\infty} I_{\text{обр}}(t) dt,$$

откуда время переключения  $\tau_n = Q_n / I_{\text{пр}}$ , где  $I_{\text{пр}}$  – значение прямого тока.

Результаты измерений на тест-структурах представлены на рис. 1.

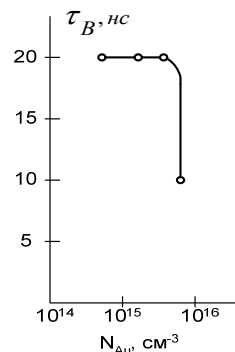


Рисунок 1 – Зависимость  $\tau_B$  от концентрации электрически активного золота

Как видно, при отношении концентрации золота к концентрации мелких доноров  $N_{\text{дм}} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в базовой области, равном 0,1...0,3  $\tau_B$  остается равным 20 нс. В области, где  $N_{Au} \rightarrow N_{\text{дм}}$   $\tau_B$  резко уменьшается в два раза. Это уменьшение совпадает с режимом возрастанием

удельного сопротивления базовой области от 1 Ом·см до  $10^4$  Ом·см вследствие ее компенсации золотом при температуре диффузии 1050 °С. Таким образом, минимальное значение  $\tau_b$  обеспечивается при температуре диффузии золота 1050 °С.

Исследуемые планарно-эпитаксиальные диоды, полученные при температуре диффузии золота 1050 °С были разделены на три серии: контрольную (К) серию (рис. 2) с оптимальными параметрами ( $Q_n \leq 100$  пКл), бракованную (Б) серию ( $Q_n = 150 \dots 200$  пКл) и бракованную (С) серию, диоды которой имели вольт-амперную характеристику (ВАХ) S-типа. Низкотемпературные измерения вольт-фарадных характеристик показали в диодах Б-серии  $N_{Au} = (1,5 \dots 4,0) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Оценка удельного сопротивления базовой области диодов К-серии составила  $(0,5 \dots 1,1) \cdot 10^4$  Ом·см. В диодах S-серии удельное сопротивление базовой области оценивалось из наклона начального участка ВАХ и составило  $(1 \dots 3) \cdot 10^6$  Ом·см (рис. 3).

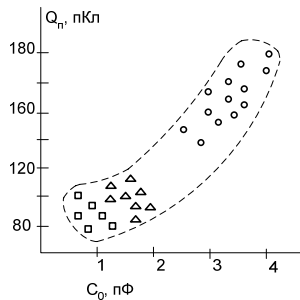


Рисунок 2 – Статистическая зависимость заряда переключения диодов (прямой ток 20 мА) от величины емкости при нулевом напряжении

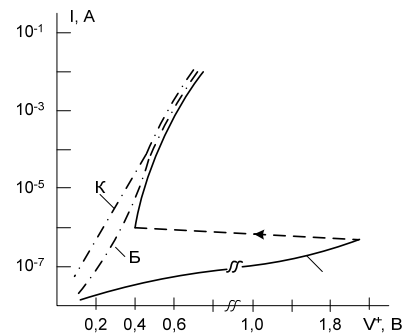


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики диодов

Приведенные данные показывают, что увеличение  $\rho$  базы в диодах К-серии приводит не только к уменьшению  $Q_n$ , но и к уменьшению емкости что для импульсных диодов является положительным фактором. С другой стороны о значительном повышении концентрации золота в диодах К-серии свидетельствует увеличение рекомбинационного тока в области 0,1...0,3 В (рис. 3). Таким образом, параметрами диодов, контролирующими минимальный заряд переключения при допустимой ВАХ являются температура диффузии золота 1050 °С и  $\rho$  базовой области  $(0,5 \dots 1,1) \cdot 10^4$  Ом·см.

Полученные данные показывают, что данный режим является критичным по отношению к однородности распределения электрофизических параметров исходного материала, а также однородности распределения электрически активного золота, поэтому стабильные параметры импульсных диодов могут быть получены только при использовании точной технологии и однородных структурно совершенных материалов.

УДК 621.373.826 – 617-089.844

### УСТРОЙСТВО ЭКСИМЕР-ЛАЗЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ЗРЕНИЯ

Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П., Юран С.И.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова  
Ижевск, Российская федерация

К основным методам и технологиям лазерной коррекции зрения относятся PRK (ФРК-фоторефрактивная кератэктомия), LASIK (лазерный кератомилез), Femto-LASIK (Фемто-ЛАСИК), LASEK (ЛАЗЕК) [1–3].

Устройства для проведения эксимер-лазерной коррекции зрения содержат эксимерный лазер, генерирующий узкий лазерный луч, оптическую отклоняющую систему и управляющий компьютер. В соответствии с заданной программой перемещений луч лазера в сканирующем режиме аблирует роговицу глаза, изменяя ее форму с целью коррекции оптической силы.

Недостатками таких устройств являются:

- невысокое качество обработанной поверхности роговицы, наличие шероховатостей и ре-

фракционных дефектов, что снижает качество получаемого зрения, особенно в сумеречных и ночных условиях;

- наличие неоднородностей поверхности роговицы вследствие больших локальных перепадов лучевой нагрузки между соседними участками роговицы, что увеличивает время заживления роговицы и повышает вероятность возникновения помутнений роговицы при проведении операций широко распространенным методом фоторефракционной кератэктомии (ФРК).

- трудность достижения заданного изменения преломляющих свойств роговицы (в сторону повышения или понижения) для четкой фокусировки изображения на сетчатке с улучшением остроты зрения при дозированном испарении



слоёв роговицы глаза с помощью луча лазера с удалением от центра рабочей зоны (зоны абляции) к периферии в связи с изменением угла падения лазерного луча;

- ограниченность применения для проведения операции алгоритмов, которые требуют изменения параметров лазерного излучения в ходе операции из-за индивидуального изменения кривизны роговицы пациента. Такие алгоритмы не могут быть реализованы иначе как с временной остановкой операции, связанной с необходимостью получения, расчета и ввода уточненных данных в блок управления лазером. Эти остановки могут вызывать негативные последствия из-за «подсушивания» поверхности роговицы за время остановки;

- необходимость ручного ввода данных в блок управления лазером, что создает вероятность ошибки оператора.

Цель работы – разработка устройства, позволяющего повысить качество эксимер-лазерной коррекции зрения.

Известно, что энергия, затрачиваемая на нагрев и испарение биоткани, пропорциональна глубине проникновения излучения в биоткань и температуре, необходимой для достижения того или иного теплового, следовательно, и хирургического эффекта (коагуляция –  $T = 70-200^{\circ}\text{C}$ ; vaporization –  $200-250^{\circ}\text{C}$ ; абляция –  $250-300^{\circ}\text{C}$ ).

Поглощенная энергия меньше падающей энергии и зависит от коэффициента отражения. Чем больше коэффициент отражения, тем меньше поглощенная энергия, и тем самым меньше глубина проникновения лазерного излучения и меньше глубина абляции.

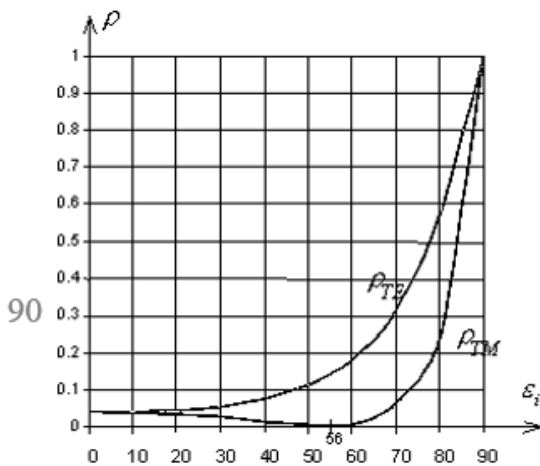


Рисунок 1 – График зависимости изменения коэффициентов отражения для ТМ и ТЕ поляризованного света от угла падения  $\epsilon$

График зависимости изменения коэффициентов отражения для ТМ (состояние поляризации света, при котором электрический вектор перпендикулярен плоскости падения) и ТЕ (состояние поляризации, при котором электрический вектор лежит в плоскости падения поляризован-

ного света), от угла падения  $\epsilon$  приведен на рисунке 1. Для неполяризованного света график располагается посередине.

Как следует из графика, при увеличении угла падения свыше  $10^{\circ}$  коэффициент отражения начинает увеличиваться, а свыше  $60^{\circ}$  начинает резко расти.

Для компенсации увеличения угла падения (уменьшение его до нуля) в установку, состоящую из эксимерного лазера, блока управления режимами работы лазера, оптической формирующей системы и компьютера, введена оптическая корректирующая система.

На рисунке 2 приведена функциональная схема предложенного устройства для эксимер-лазерной коррекции зрения.

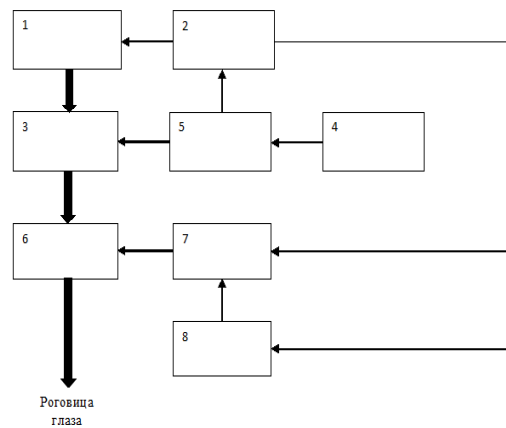


Рисунок 2 – Блок-схема устройства для эксимер-лазерной коррекции зрения

Устройство содержит эксимерный лазер 1, информационный вход которого соединен с первым выходом блока управления режимами 2. Оптический выход лазера 1 соединен с оптическим входом оптической формирующей системы 3. Излучение с выхода формирующей оптической системы 3 поступает на гальвозеркала 6, а с них – на оперируемую роговицу глаза.

Компьютер 4, в котором производится расчет операции, соединен своим информационным выходом со входом контроллера 5, а выходы контроллера 5 соединены с информационным входом оптической формирующей системы 3 и со входом блока управления режимами лазера 2, второй выход блока управления режимами лазера 2 соединен со входом гальвоприводов 8 и первым входом платформ 7, выход гальвоприводов 8 соединен со вторым входом платформ 7, а выход платформ 7 соединен с гальвозеркалами 6.

Основной частью гальвопривода 8 является гальванометр, который поворачивается под действием управляющего сигнала.

Гальвозеркала – зеркала, приводимые в действие с помощью гальванометра, используются для управления движением лазерного луча на поверхности роговицы. Они жестко укреплё-

ны на платформах 7 и с помощью гальвопривода под действием управляющего сигнала перемещают выходной луч лазера по роговице по требуемой траектории.

Предложенное устройство работает следующим образом.

После расчета режимов операции информация с компьютера 4 поступает в контроллер 5, который в требуемой последовательности формирует управляющие сигналы для оптической формирующей системы 3 и блока управления режимами лазера 2. Излучение с лазера 1 через формирующую систему 3 поступает на гальвозеркала 6.

В ходе операции в соответствии с алгоритмом обработки роговицы контроллер 5 изменяет режимы работы лазера 1 и формирующей оптической системы 3. С компьютера 4 данные переносятся в блок управления лазером 2, с которого информация поступает на информационный вход эксимерного лазера 1, и вход гальвопривода 8.

В процессе операции поворот гальванометра вызывает перемещение платформ 7 по установленным направляющим и, соответственно, поворот гальвозеркал 6. За счет этого угол падения лазерного луча уменьшается, приближаясь к требуемому текущему значению. После того, как платформа 7 займет заданное положение, излучение лазера 1 через формирующую систему 3 и гальвозеркала 6 поступает на роговицу глаза. При этом операция выполняется без остановок.

Таким образом, повышение качества проведения операции по коррекции зрения достигается за счет изменения угла падения лазерного луча на роговицу при удалении от центра зоны абляции к периферии при одновременном изменении режима работы лазера непосредственно в процессе операции.

Использование предложенного устройства позволяет улучшить качество коррекции без ограничения на применение современных алгоритмов проведения рефракционных операций, сократить время операции, а также исключить негативное влияние человеческого фактора в процессе переноса данных между составляющими эксимер-лазерной установки.

#### Литература

1. Bower K.S. Laser refractive surgery. [www.uptodate.com](http://www.uptodate.com).
2. Чупров А.Д., Дурягина М.Н. Анализ эффективности методов хирургической коррекции миопии высокой степени // Современные технологии в медицине. – 2010. – Вып. 4. – С. 61–64.
3. Sekundo W., Gertner J., Bertelmann T., Solomatin I. One-year refractive results, contrast sensitivity, high-order aberrations and complications after myopic small-incision lenticule extraction (ReLEx SMILE) // Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. – 2014. – Vol. 252. – Iss. 5. – P. 837–843. – DOI:10.1007/s00417-014-2608-4.

УДК 621.375.826

### МЕТОД ОПТИКОВОЛОКОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА РЕСПИРАБЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ АТМОСФЕРЫ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Загрязнение приземного слоя атмосферы взвешенными частицами (аэрозолями) различной природы ухудшает экологическую обстановку и отрицательно влияет на здоровье людей. Особую опасность представляет загрязнение атмосферы мелкодисперсными твердыми частицами (респираторными фракциями) с размерами менее 1,0; 2,5 и 10 мкм – PM<sub>1,0</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> (от английского термина Particulate Matter). Согласно данным исследований [1, 2], повышенное содержание в воздухе респираторных фракций является одним из факторов риска развития респираторных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Определение массовых концентраций таких частиц с разделением на респираторные фракции лидарными методами представляет собой сложную методологическую проблему, связанную с решением обратных задач в условиях недостаточности априорных сведений о объекте исследо-

вания, в особенности, для таких неустойчивых образований, как городской аэрозоль. Для решения данной проблемы используется многоканальное лазерное зондирование, комбинация механизмов упругого и комбинационного рассеяния с регистрацией спектрально-временной структуры сигналов обратного рассеяния, применение различных регуляризирующих и регрессионных алгоритмов по восстановлению микрофизических параметров аэрозоля [3, 4].

В качестве альтернативного подхода нами предложен метод оптиковолоконной диагностики респираторных частиц с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) малого класса. Метод позволяет осуществлять оперативную мало затратную диагностику как массовых, так и счетных концентраций твердых частиц в приземных слоях атмосферы с разделением на респираторные фракции. Данный метод особенно актуален

в связи с развитием беспилотной авиации в Республике Беларусь.

Реализация метода осуществляется оптиковолоконными детекторами (ОВД), например, рассмотренных в [5]. Световые сигналы  $U_i(\tau)$  регистрируются от одиночных частиц, находящихся в непосредственной близости к приемно-излучающей апертуре  $A_d$  ОВД.

Частицы освещаются низкокогерентным излучением лазерных диодов мощностью 1–5 мВт. При этом плоскость апертуры одиночного сенсора или матрицы ОВД располагают перпендикулярно вектору скорости полета БЛА.

Регистрируемые сигналы от одиночных частиц представляют собой импульсные сигналы. В общем виде длительность  $\tau_i$  светового импульса  $U_i(\tau)$  от одиночной частицы на выходе ОВД определяется соотношением

$$\tau_i = \tau_{f.i+} + \tau_{f.i-} + \tau_{p.i} = 2\tau_{f.i} + \tau_{p.i}, \quad (1)$$

где  $\tau_{f.i+}$ ,  $\tau_{f.i-}$  – длительности переднего и заднего фронтов импульса, обусловленных временами вхождения в зону апертуры  $A_d$  и выхода из зоны  $A_d$  частицы, соответственно;  $\tau_{p.i}$  – время нахождения всей частицы в зоне апертуры  $A_d$

$$\tau_{f.i} = \tau_{f.i+} = \tau_{f.i-} = A_d / \vec{W}_p, \quad (2)$$

$$\tau_{p.i} = (D_{p.i} - A_d) / \vec{W}_p, \quad (3)$$

$$\tau_i = 2A_d / \vec{W}_{p.i} + (D_{p.i} - A_d) / \vec{W}_p, \quad (4)$$

где  $D_{p.i}$  – линейный размер частицы в направлении вектора скорости направления полета БЛА;  $\vec{W}_p$  – воздушная скорость полета БЛА;  $A_d$  – диаметр апертуры ОВД,  $A_d \leq D_{p.i.min}$ .

Как следует из (4) точность знания воздушной скорости БЛА  $\vec{W}_p$  имеет важное значение для последующей процедуры определения размеров частиц  $D_{p.i}$ . При этом точность непосредственного определения воздушной скорости БЛА с использованием измерителей воздушной скорости (трубки Пито и т. п.) является недостаточной для реализации высокой точности определения размеров и разделения частиц на респираторные фракции.

В этой связи оценка длительности информационных импульсов  $U_i(\tau)$  осуществляется при двух параметрах дискриминации  $k_i$  по уровню сигналов:

$$k_i = (U_{g.i} - U_{min.i}) / U_{m.i}; \quad k_2 = 1 - k_1, \quad (5)$$

где  $U_{g.i}$  – уровень дискриминации;  $U_{min.i}$  и  $U_{m.i}$  – минимальное значение и амплитуда  $i$  – того сигнального импульса  $U(\tau_i)$ , соответственно.  $U_{m.i} = U_{max.i} - U_{min.i}$  – амплитуда сигнального импульса.

С учетом  $k_i$ , отношение длительности фронтов сигнального импульса  $\tau_{f.i}(U_{g.i})$  на уровне дискриминации  $U_{g.i}$  к длительности

по его основанию  $\tau_f$  определяются отношением фронтов импульса по его основанию  $\tau_f$

$$\tau_{f.i}(U_{g.i}) / \tau_f = k_i U_{m.i} / U_{m.i} = k_i. \quad (6)$$

Из уравнения (2) с учетом уравнения (6) длительности фронтов сигнального импульса на произвольном уровне дискриминации можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \tau_{f.i}(U_{g.i}) &= \tau_{f.i+}(U_{g.i}) = \\ &= \tau_{f.i-}(U_{g.i}) \tau_{f.i} = k_i (A_d / W_p). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании уравнений (4) и (7) длительность импульсов информационных сигналов  $\tau_i$  для различных значений  $k_i$ , равна:

$$\tau_i(k_i) = D_{p.i} / W_p + A_d(2k_i - 1) / W_p. \quad (8)$$

В соответствии с условием (5)  $k_2 = 1 - k_1$  и уравнения (8) длительности сигнальных импульсов с параметрами дискриминации  $k_1$  и  $k_2$  соответственно равны:

$$\tau_i(k_1) = D_{p.i} / W_p + A_d(2k_1 - 1) / W_p \quad (9)$$

$$\tau_i(k_2) = D_{p.i} / W_p + A_d(1 - 2k_1) / W_p, \quad (10)$$

Значения воздушной скорости БЛА  $W_p$  и линейные размеры частиц  $D_{p.i}$  (спектр размеров) определяются из уравнений (9) и (10) в виде:

$$W_p = 2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{p.i} &= \{[\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)] / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]\} \times \\ &\times A_d(2k_1 - 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Протяженность дистанции полета  $R = W_p T$  за время измерения  $T$  определяется уравнением:

$$R = (2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]) T. \quad (13)$$

Истинное объемное содержание частиц заданной фракции на дистанции  $R$  за время измерения  $T$  определяется из уравнения (14)

$$\varphi = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^n [\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)], \quad (14)$$

где  $n$  – число частиц заданного размера  $D_{p.i}$ , прошедших через измерительную апертуру ОВД  $A_d$  за время  $T$ .

Размер апертуры ОВД  $A_d$  определяется диаметром сердцевины используемого световода 10 мкм и формирующей короткофокусной линзы с коэффициентом увеличения 5–10.  $A_d$  выбирается из условий обеспечения требуемой разрешающей способности и обеспечения наилучшего соотношения сигнал / шум, которое при прочих равных условиях пропорционально отношению размеров (площадей) частицы с минимальными размерами  $D_{p.min}$  и диаметра используемого световода ОВД  $D_{св}$ , т. е. отношением  $D_{p.min} / D_{св}$ .

Автоматизированная обработка данных требует представления выходных сигналов ОВД

цифровой форме. Выбор шага дискретизации по времени  $\Delta t$  при заданной ошибке квантования по уровню  $\Delta U$  является определяющим фактором для обеспечения высокой точности параметров преобразования.

Выбор требуемого шага дискретизации  $\Delta t$  проведен по критерию измерения скорости БЛА с заданной относительной погрешностью:

$$\delta_w = \frac{\Delta W}{W_p}, \quad (15)$$

где  $\Delta W$  – абсолютная погрешность измерения скорости (элемент разрешения по скорости).

Данную величину можно представить в виде:

$$\delta_w = \frac{A_D}{W_p \tau_f n_d} = \frac{1}{n_d}, \quad (16)$$

где  $n_d$  – требуемое число точек дискретизации с равномерным шагом  $\Delta t$  по длительности  $\tau_f$ .

В этой связи

$$\Delta t = \tau_f \delta_w. \quad (17)$$

Из (17) с учетом верхней граничной частоты сигналов ОВД  $f_{в.гр} = W_p / 0,35 A_d$  требуемый шаг дискретизации определяется уравнением:

$$\Delta t = \frac{\delta_w}{0,35 f_{в.гр}}, \quad (18)$$

при заданной погрешности  $\delta_w$  и апертуры ОВД  $A_d$ .

Полученные оценки обнаружительной способности и точности определения линейных размеров частиц опасных респираторных фракций: чувствительность – на уровне обнаружения одиночных частиц (счетных концентраций); погрешность определения линейных размеров частиц не более 5-7 %.

Разработанный метод открывает широкие возможности оперативной малозатратной диагностики микрофизических параметров твердофазного аэрозоля с БЛА, реализуется на БЛА малых классов с допустимой целевой нагрузкой 0,5-0,8 Кг и энергообеспечением на уровне 1,5-2 Вт.

### Литература

1. Моношкина В.Г., Суторихин И.А. Опасная респираторная фракция частиц приземного атмосферного аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана, 1996. – Т. 9. – № 06. – С. 843–845.
2. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change [Electronic resource] / R.A. Silva [et al] // Environmental Research Letters / 2013. – Vol.8, № 3. Mode of access: <http://iopscience.iop.org/article/10/1088/1748-9326/8/3/034005/pdf>.-Date of access:14.08.2018.
3. Зуев В.Е., Наец И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск : Наука, 1982. – 242 с.
4. Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В. Многочастотное зондирование загрязненной атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции // Оптика атмосферы и океана, 2016. – Т. 29. – № 1. – С. 70–79.
5. Иванов В.И., Лазарчик А.Н. Низкокогерентная оптико-волоконная диагностика пароводяных потоков // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сб. докладов V Междунар. научно-практ. конф. РФ. Липецк, 2012. – С. 138–140.

УДК 621.382

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА КРЕМНИЙ-ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Изучение влияния быстрой термообработки на параметры границы раздела кремний-двуокись кремния проводилось путем анализа вольтфарадных характеристик и пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) такой системы. Первый из методов относится к традиционным методам характеризации полупроводниковых структур [1]. Анализ пространственного распределения КРП осуществлялся по методу сканирующего зонда Кельвина с использованием измерительной системы бесконтактной характеризации полупроводниковых пластин СКАН-2013 [2]. В качестве образцов для исследования использовались кремниевые пластины КЭФ 4,5 и КДБ 12 с пленкой двуокиси кремния, сфор-

мированной пирогенным окислением. Часть пластин перед этим проходила операцию предварительной термообработки. На данных пластинах, как прошедших предварительную обработку, так и без таковой, были проведены указанные исследования вольтфарадных характеристик и пространственного распределения КРП по их площади. После этого для пленки двуокиси кремния на всех пластинах была проведена операция быстрой термообработки при температуре 850 °С, после чего выполнена повторная характеризация электрофизических свойств их поверхности.

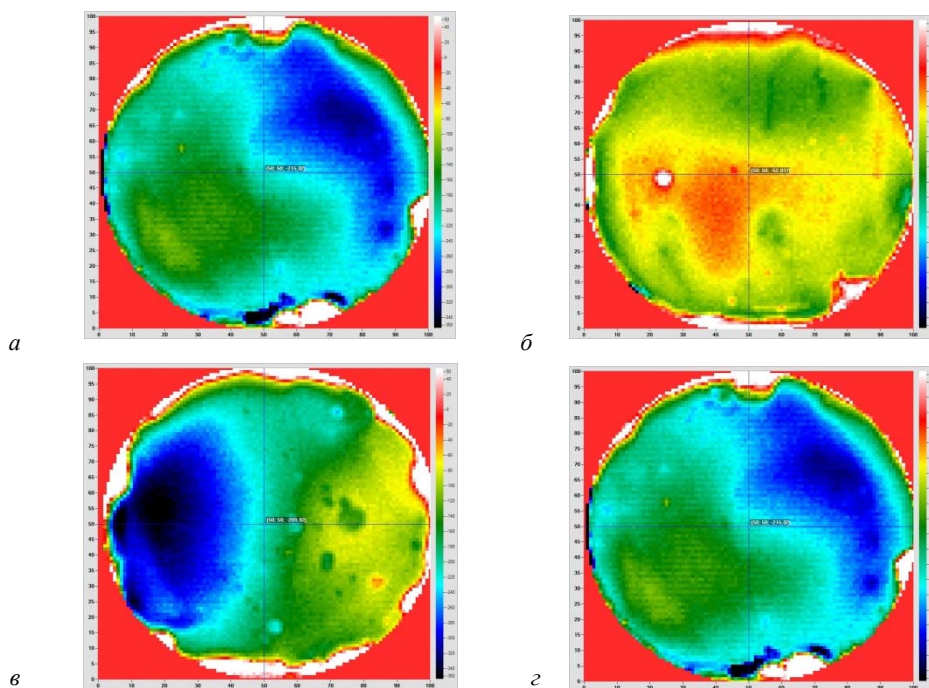
Анализ вольтфарадных характеристик МОП-структур на кремнии *p*-типа с предварительной быстрой термообработкой и без нее до и после

пирогенного термического окисления и тех же характеристик для кремния *n*-типа показал (табл.), что проведение быстрой термообработки приводит к уменьшению напряжения плоских зон от 20 до 60 раз для кремния КЭФ 4,5 и в 1,5 раза для

кремния КДБ 12. При этом плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния уменьшается для кремния КЭФ 4,5 от 2,6 до 3,7 раза и для кремния КДБ 12 от 3,2 до 4,3 раза.

Таблица – Параметры двуокиси кремния, выращенной на кремнии с его предварительной быстрой термообработкой и без таковой, после быстрой термообработки

| Параметры двуокиси кремния        |                 | Тип пластины          |                       |                       |                       |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   |                 | КЭФ 4,5               |                       | КДБ 12                |                       |
|                                   |                 | Без обработки         | С обработкой          | Без обработки         | С обработкой          |
| Толщина пленки, нм                | Исходная        | 48,05                 | 48,13                 | 48,42                 | 48,48                 |
|                                   | После обработки | 45,74                 | 45,92                 | 45,88                 | 45,55                 |
| Напряжение плоских зон, В         | Исходное        | -0,331                | -0,324                | -1,837                | -1,773                |
|                                   | После обработки | 0,005                 | -0,017                | -1,254                | -1,187                |
| Плотность заряда, см <sup>2</sup> | Исходная        | 5,26·10 <sup>10</sup> | 3,41·10 <sup>10</sup> | 3,80·10 <sup>11</sup> | 3,52·10 <sup>11</sup> |
|                                   | После обработки | 1,43·10 <sup>10</sup> | 1,33·10 <sup>10</sup> | 1,16·10 <sup>11</sup> | 8,16·10 <sup>10</sup> |



*а* – для кремния КЭФ 4,5 без обработки, *б* – для кремния КЭФ 4,5 с обработкой, *в* – для кремния КДБ 12 без обработки, *г* – для кремния КДБ 12 с обработкой

Рисунок – Распределение КПП в системе SiO<sub>2</sub> – Si по площади пластины после быстрой термообработки на пластинах кремния с предварительной обработкой и без нее

Было обнаружено, что проведение быстрой термообработки кремния после окисления вызывает существенное изменение вольтфарадных характеристик. Как следует из их анализа, после такой обработки на поверхности окисленной пластины практически отсутствует инверсионный слой и наблюдается существенное снижение величины положительного заряда на границе раздела за счет его отжига. Это говорит о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-двуокись кремния, полученной его пирогенным окислением, после быстрой термообработки. Тем не менее, в окис-

ле остается остаточный фиксированный заряд небольшой величины. На пластинах, прошедших предварительную быструю термообработку, заряд на границе раздела до 1,5 раза меньше, чем на пластинах, не проходивших такой обработки. Это указывает на то, что зарядовые свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник на пластинах, не проходивших предварительной быстрой термообработки, определяются как нарушенной микроструктурой верхнего слоя двуокиси кремния, так и несовершенной структурой остального объема диэлектрика из-за низкой температуры процесса окисления.

При таких температурах (850 °С) формируются слои, имеющие напряженные связи Si-O, оборванные связи Si не заполненные кислородом, уменьшенную силу связей Si-O, измененные углы связей Si-O по сравнению со слоями диэлектрика, получаемого путем термического окисления кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С и выше [3].

Данные исследования распределения КРП по площади пластины показали, что после проведения быстрой термической обработки как на пластинах, проходивших предварительную термообработку, так и без нее наблюдается равномерное распределение КРП по площади пластины (рис.). При этом имеет место значительное повышение КРП (поверхностного потенциала) на границе раздела кремний-диоксид кремния. Так, на пластинах КЭФ 4,5, не проходивших предварительной обработки после быстрой термообработки диоксида кремния, КРП повысилась с минус 1,211 до минус 0,215 В, а для пластин, прошедших обработку, она повысилась с минус 1,134 до минус 0,052 В. В случае пластин КДБ 12 эти величины составили с минус 0,725 до минус 0,210 В и с минус 0,359 до минус 0,284 В соответственно. Можно утверждать о значительном

улучшении свойств границы раздела кремний-диоксид кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры диоксида кремния по всей ее толщине.

#### Литература

1. Gorban, A.P. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method / A.P. Gorban, V.G. Litovchenko, P.Ch. Peikow // Phys. State Sol. (a). – 1972. – V. 10, № 1. – P. 289–292.
2. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Воробей Р.И., Жарин А.Л., Гусев О.К., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.
3. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // ФТП. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.

УДК 621.384.3

### МЕТОД СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Повышение эффективности обнаружения и распознавания различных удаленных объектов, включая малоконтрастные объекты и объекты с нулевой контрастностью, является основной задачей разработки и создания современных лазерно-локационных систем видения и автоматизированного «машинного» распознавания [1, 2]. Приоритетным направлением в этой задаче является создание трехмерных лазерных локаторов (3D-лидаров), обеспечивающих получение дальностных трехмерных изображений объектов [3, 4].

В таких системах дальностные трехмерные изображения объектов получают в виде матрицы (карты) расстояний до каждого из N элементов поверхности объекта. В качестве фотодетекторов в таких системах используются высокочувствительные многоэлементные фотодетекторы «мгновенного» действия с независимыми выходами всех фотодетекторов, обеспечивающие адекватное представление временной информации о моментах прихода отраженного сигнала на каждый из фотодетекторов путем времяпролетных «старт-стопных» измерений. Это позво-

ляет реализовать метод лазерной стереометрии, а именно, прямой метод измерения трехмерной формы объекта наблюдения в полярных координатах (угол-угол-дальность).

Основная сложность практической реализации данного подхода заключается в необходимости пропорционального увеличения числа времяизмерительных каналов с увеличением дискретной размерности матрицы  $N = N_x N_y$ . Так, например, даже при относительно небольшой размерности  $N = 64 \times 64$  элемента требуется 4096 времяпролетных измерительных каналов. Кроме того, также требуется N аналого-цифровых измерительных каналов для получения полутоновых изображений объекта или отдельная ПЗС-матрица с элементами обработки сигналов.

В 3D-лидарах зарубежного производства для этой цели используются специальные высокоинтегрированные 3D-камеры [3, 4].

Решение данной задачи с использованием гибридных технологий [5, 6] существенно ограничивает быстродействие и возможность получения трехмерных изображений без механического сканирования с высоким пространственным раз-

решением по кадру, т. е. с увеличением числа элементов  $N$ .

В предложенном методе стереометрической лазерной локации, основанный на применении стробируемых многоэлементных фотодетекторов с накоплением заряда, имеющих только один или более информационных выходов, таких как ПЗС, гибридные электронно-оптические преобразователи, представляющие собой ЭОП сопряженные с ПЗ-камерами. Базовая концепция метода была впервые предложена нами в работах [7, 8], дальнейшее развитие теории метода приведено в [9]. Метод позволяет одновременно получать как трехмерные, так полутонные изображения объектов с высоким быстродействием и разрешением на большом множестве точек поверхности  $N$  при использовании только одного времяизмерительного канала.

Длительность зондирующих лазерных импульсов должна удовлетворять условию

$$\tau_n \geq 2\xi_{e,max}(\vec{r}_1)/c, \quad (1)$$

где  $\xi_{e,max}(\vec{r}_1)$  – максимальное значение возвышения рельефа объекта;  $c$  – скорость света.

Координаты в плоскости изображения оптической системы лидара (ОС) введены таким образом, чтобы между координатами точек лоцируемой поверхности объекта и координатами ее парааксиального изображения существовала простая связь:

$$\vec{S} = \beta \vec{r}_1, \quad (2)$$

где  $\beta = d/R$  – коэффициент увеличения приемной ОС лидара;  $d$  – расстояние от линзы ОС до плоскости изображения, в которой установлен двумерный детектор изображений;  $R$  – расстояние от лидара до поверхности объекта; где  $\vec{S}$  – вектор координат в плоскости изображения лидара;  $\vec{r}_1$  – вектор координат в предметной плоскости.

Для описания пространственно-временной структуры отраженных световых полей введем функцию  $f(t) > 0$ , которая отлична от нуля на интервале времени равном длительности лазерного излучения  $\tau_n$  и имеет максимальное значение равное единице.

В рамках данной модели отраженный сигнал  $E_k(\vec{r}_1, t)$  можно представить совокупностью  $k$  парциальных пучков (субпучков), отраженных от  $k$  точек поверхности в радиальном направлении. Под парциальным пучком понимаем лазерное излучение, попадающее на один элемент (пиксель) двумерного матричного фотодетектора ОС. Временное распределение запаздывание времени прихода  $\tau_k(\vec{S}, t)$  каждого из субпучков относительно момента излучения лазерного импульса  $t_0$  однозначно связано с распределением возвышений рельефа  $\xi_b(\vec{r}_1)$  поверхности объекта. При этом пространственно – временная структура отраженного светового поля определяется уравнением:

$$I(\vec{S}, t) = \sum_k f^2(t - \tau_k) |E_k(\vec{S})|^2, \quad (3)$$

где  $\tau_k = 2R_{\xi_{\text{ск}}}/c$  – время прихода лазерного импульса, отраженного от возвышения поверхности в  $k$ -той точке, находящейся расстоянии  $R_{\xi_{\text{ск}}}$  от лидара.

В соответствии с алгоритмом метода регистрируется два двумерных распределения интенсивности  $N$  парциальных пучков  $B_1(\vec{S})$ ,  $B_2(\vec{S})$  отраженного светового поля. Причем распределение  $B_1(\vec{S})$  должно обязательно включать передний или задний фронт отраженного поля. В частности, для участка реализации  $E(\vec{S}, t)$ , содержащего передний фронт поля, распределение  $B_1(\vec{S})$  получаем путем двумерного накопления поля  $E(\vec{S}, t)$  в пространственно – временном стробе длительностью:

$$\tau_{c,1} = t_2 - t_1, \quad (4)$$

где  $t_1$  – момент начала прихода отраженного светового поля;  $2\xi_{e,max}(\vec{r}_1)/c \leq t_2 \leq \tau_n$ .

В соответствии с (3) и (4)  $B_1(\vec{S})$  определяется уравнением

$$B_1(\vec{S}) = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \times \\ \times \int_{t_1}^{t_2} f^2(t - \tau_k) dt = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) \times \\ \times |E_k(\vec{S})|^2 (t_2 - \tau_k), \quad (5)$$

Второе распределение  $B_2(\vec{S})$  получаем путем двумерного накопления полной реализации поля  $E(\vec{S}, t)$  по всей длительности его реализации  $T$ :

$$B_2(\vec{S}) = K_{\text{отр}}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \times \\ \times \int_{t_1}^{t_1+T} f^2(t - \tau_k) dt = \\ = K_{\text{отр}}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \tau_n. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что двумерное распределение  $B_2(\vec{S})$  представляет собой полутонное изображение лоцируемого объекта с селекцией фона обратного рассеяния.

Из отношения (5) и (6) получаем двумерное распределение временных сдвигов  $N$  парциальных пучков отраженного излучения в следующем виде:

$$\tau(\vec{S}) = t_2 - \tau_n B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S}). \quad (7)$$

Отсюда, получаем распределение искомого возвышений лоцируемого объекта (рельеф) на множестве  $N$  точек его поверхности:

$$\xi_b(\vec{r}_1) = c/2(t_2 - \tau_n B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S})), \quad (8)$$

а также расстояний  $R_{\xi}(\vec{r}_1)$  до каждой из точек возвышений в виде:

$$R_{\xi}(\vec{r}_1) = R_0 + \xi_b(\vec{r}_1), \quad (9)$$

где  $R_0 = R_{\xi,max}$  – базовое расстояние, определяемое путем измерения длительности временного

интервала  $t_1 - t_0$ , как расстояние до точки поверхности с максимальным возвышением.

Предложенный метод стереометрической лазерной локации позволяет одновременно определять как полутоновые изображения лоцируемых объектов с селекцией фона обратного рассеяния, так и их трехмерные характеристики  $\xi_k(\vec{r}_1)$  и расстояния  $R_\xi(\vec{r}_1)$  на большом множестве  $N$  точек поверхности объекта, которое может составлять десятки и сотни тысяч в зависимости от размерности используемых фотодетекторов с накоплением заряда. Разрешающая способность метода  $\Delta\xi_B(\vec{r}_1)$  не хуже 0,8-1,5 см.

### Литература

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 478 с.
2. Балоев В.Н., Мишанин С.С., Овсянников В.А., Якубсон С.Е., Яцык В.С. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения // Оптический журнал, 2012. – Т 9. – № 3. – С. 22–32.
3. Chua S.Y., Wang X., Guo N., Tan C.S., Chai T.Y., Seet G.L. Improving three-dimensional (3D) range gated reconstruction through time-of-

flight (TOF) imaging analysis // J.Eur. Opt. Soc.-Rapid. 2016. 11(16015). P.16015-1 – 16015-6.

4. Itzler M. 3-D LIDAR Imaging Cameras with Single-Photon Sensitivity based on Geiger-mode APDS. // ILMF 2015 – Denver. 2015. P. 1–42.

5. Ярошенко И.Ф., Ильин С.А., Капитанов Г.А. Трехмерное приемное устройство лазерного излучения // Оптический журнал, 2005. – Т. 72. – № 10. – С. 35–39.

6. Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н. Лазерная информационная система сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал, 2015. – Т. 82. – № 2. – С. 27–33.

7. Пат. SU №1593429 А1, G01S17/00. «Способ стереометрической оптической локации» / Иванов В.И. 1988.

8. Пат. SU №1591621 А1, G01C3/08. «Способ определения рельефа лоцируемого объекта при импульсной локации» / Иванов В.И. 1988.

9. Иванов В.И., Иванов Н.И. Получение дальностных 3D изображений высокодинамичных объектов по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения // Квантовая электроника, 2018. – Т. 48. – № 7. – С. 679–682.

УДК 621.3.083.92

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>,  
Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Колтунович Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Одной из типичных задач электрических измерений является задача определения фазового сдвига двух гармонических сигналов. В частности, определение фазового сдвига сигналов отклика электрометрического зонда в двух пространственно разнесенных точках поверхности полупроводниковой пластины является одной из составляющих разрабатываемого метода характеристики приповерхностных слоев полупроводника.

Обработка сигналов производится методом DSP (Digital Signal Processing, цифровая обработка сигналов) с использованием математических библиотек CMSIS DSP Software Library [1] для процессора ARM Cortex M7. При регистрации двух гармонических сигналов, сдвиг фаз между которыми требуется определить, производится их аналого-цифровое преобразование, в результате которого в памяти процессора формируются два массива данных  $U1$  и  $U2$  по 512 элементов в каждом. Длина каждого из массивов соответствует 4 целым периодам  $T$  колебаний сигнала. Шаг квантования, таким образом, составляет  $\Delta t = 4T/512 = T/128$ . Отсчеты сигнала в

массивах представлены в 32-битном знаковом формате с плавающей запятой (**float32**). Первичная обработка сигналов включает в себя центрирование массивов, т.е. вычисление и вычитание из массива среднего арифметического значения, вследствие чего в массивах содержится информация только о переменной составляющей измерительных сигналов.

Для упрощения дальнейших вычислений оба массива нормируются на 1 путем нахождения максимального элемента в каждом из массивов и деления на него всех элементов соответствующего массива:

$$\begin{aligned} U1[i] &= U1[i]/\max(U1), \\ U2[i] &= U2[i]/\max(U2). \end{aligned} \quad (1)$$

После выполнения этой операции оба массива будут содержать элементы с диапазоном значений  $u_1[i] \in [-1; 1]$  и  $u_2[i] \in [-1; 1]$ .

Пусть в первом массиве содержатся отсчеты гармонического сигнала с единичной амплитудой и начальной фазой  $\varphi_0$ :



$$U1[i] = 1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{64} \cdot i + \varphi_0\right). \quad (2)$$

Второй массив содержит отсчеты гармонического сигнала с той же частотой и амплитудой, но сдвинутые по фазе относительно первого сигнала на величину  $\Delta\varphi$ :

$$U2[i] = 1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{64} \cdot i + \varphi_0 + \Delta\varphi\right). \quad (3)$$

Работа фазового детектора традиционной схемы [2] основывается на аппаратном перемножении двух гармонических сигналов. Умножая (2) на (3), получаем

$$\begin{aligned} U1 \cdot U2 &= \sin\left(\frac{\pi}{64} \cdot i + \varphi_0\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{64} \cdot i + \varphi_0 + \Delta\varphi\right) \\ &= \frac{\cos \Delta\varphi - \cos\left(\frac{\pi}{32} \cdot i + 2\varphi_0 + \Delta\varphi\right)}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегрирование выражения (4) по всему доступному диапазону дает

$$\begin{aligned} \int_0^{511} (U1 \cdot U2) di &= \\ &= \int_0^{511} \frac{\cos \Delta\varphi}{2} di - \int_0^{511} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{32} \cdot i + 2\varphi_0 + \Delta\varphi\right)}{2} di = \\ &= 256 \cos \Delta\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

поскольку член  $\cos\left(\frac{\pi}{32} \cdot i + 2\varphi_0 + \Delta\varphi\right)$  интегрируется за целое количество периодов (в данном случае, 4).

Поскольку массивы **U1** и **U2** содержат дискретные наборы значений, интегрирование может быть заменено суммированием:

$$\int_0^{511} (U1 \cdot U2) di = \sum_{i=0}^{511} (u_1[i] \cdot u_2[i]). \quad (6)$$

Как можно видеть, выражение (6) соответствует формуле скалярного произведения векторов размерности 512. В программном коде на языке С данная операция реализуется посредством использования функции **arm\_dot\_prod\_f32** из состава библиотеки CMSIS DSP Software Library.

Исходя из этого, алгоритм определения фазового сдвига методом DSP может выглядеть следующим образом:

1. Исходные массивы, содержащие отсчеты двух гармонических сигналов за целое количество периодов (в частности, 4), нормируют по их наибольшему значению. Данные в массивах представляются в знаковой форме в формате с плавающей запятой.

2. К полученным нормированным массивам применяют операцию скалярного произведения векторов **arm\_dot\_prod\_f32**.

3. Полученное значение делят на число  $N/2$ , где  $N$  – число отсчетов сигнала (число элементов в каждом из массивов).

4. Величину фазового сдвига  $\Delta\varphi$  находят как арккосинус от результата деления.

Для оценки устойчивости данного алгоритма к погрешностям регистрации сигналов и возможным помехам (наводкам) было выполнено компьютерное моделирование в среде MathCAD.

На первом этапе выполнялось сравнительное моделирование вычислений по формуле (5) для случая непрерывных (не дискретизированных) сигналов  $u_1(i)$  и  $u_2(i)$  и вычислений скалярного произведения векторов согласно формуле (6) для дискретных значений  $i$ . Полученные результаты оказались идентичными для всех возможных значений фазового сдвига при размерности перемножаемых векторов (числе точек дискретизации) от 8 и более; значительные погрешности вычисления наблюдались только при уменьшении количества точек дискретизации ниже указанной величины. Фактически, для используемых 512-элементных массивов погрешность дискретизации можно считать отсутствующей при условии, что записанные в массивах отсчеты составляют целое количество периодов сигнала. С другой стороны, отличие размерности массива отсчетов сигнала от целого количества периодов на 1 отсчет (что соответствует погрешности определения периода  $((1/4)/512) \cdot 100\% = 0,04\%$ ) приводит к погрешности вычисления фазового сдвига около 0,1%. При погрешности определения периода 1% ( $\pm 20$  отсчетов за 4 периода) погрешность вычисления фазового сдвига составляет уже  $\pm 4\%$ .

На втором этапе моделировалось влияние гармонических искажений в спектре регистрируемого сигнала на результат вычисления фазового сдвига. Для упрощения анализа модель включала введение в описание сигнала одного дополнительного слагаемого, соответствующего наличию одной дополнительной гармоники с произвольной амплитудой  $U_n$ , частотой  $\omega_n$  и начальной фазой  $\varphi_n$ . Рассматривались две практически возможных ситуации:

1) Гармоника описывает внешнюю независимую наводку, одинаково воздействующую на оба перемножаемых сигнала. В этом случае их описание приобретает вид

$$\begin{cases} u_1(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \\ u_2(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi) + U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \end{cases} \quad (7)$$

Равенство амплитуд сигналов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  принято с учетом нормирования массивов, содержащих отсчеты этих сигналов.

Произведение сигналов (7), помимо слагаемого (4), содержит три дополнительных члена  $U_n^2 \sin^2(\omega_n t + \varphi_n)$ ,  $U_0 U_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$

и  $U_0 U_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$ . Как можно видеть, интегрирование данных слагаемых за время  $t_n = 8\pi/\omega$  дает результат, отличный от 0, формируя таким образом систематическую погрешность измерения.

2. Гармонические искажения являются свойством самого сигнала, вследствие чего претерпевают тот же фазовый сдвиг, что и сигнал:

$$\begin{cases} u_1(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \\ u_2(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi) + \\ + U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n + \Delta\varphi) \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае в произведении сигналов присутствуют члены  $U_n^2 \sin(\omega_n t + \varphi_n) \sin(\omega_n t + \varphi_n + \Delta\varphi)$ ,

$$U_0 U_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\omega_n t + \varphi_n + \Delta\varphi) \text{ и} \\ U_0 U_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi) \sin(\omega_n t + \varphi_n).$$

Приведение к 0 данных составляющих (за исключением составляющей  $\cos\Delta\varphi$ ) путем интегрирования возможно только в случае кратности частот  $\omega_n$  и  $\omega_0$  и совпадения начальных фаз  $\varphi_n$  и  $\varphi_0$ .

При моделировании частота полезного сигнала задавалась равной 300 Гц, частота дополнительной гармоники варьировалась в диапазоне от 600 Гц до 100 000 Гц. Амплитуда гармоники была принята равной 0,2 амплитуды полезного сигнала. При указанных параметрах максимальные значения погрешности, определяемые как разность заданного и вычисленного значений фазового сдвига, по результатам моделирования для разных соотношений частот сигнала и наводки составили от 3 % до 7 % как для первого, так и для второго моделируемого случая. Для устранения (уменьшения) данной погрешности требуется экранирование входных цепей измерительного преобразователя от наводок либо фильтрация сигнала.

#### Литература

1. CMSIS DSP Software Library [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>.
2. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Уч. пос. для студентов вузов / Э.Г. Атамалян. – М.: Высшая школа, 2005. – 416 с.

УДК 621.375.826

### РЕГУЛИРОВКА ПЕРИМЕТРА РЕЗОНАТОРА КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Кривицкий П.Г.<sup>1</sup>, Исаев А.В.<sup>1</sup>, Матюшевский В.М.<sup>1</sup>, Оксенчук И.Д.<sup>2</sup>, Кузьмицкая С.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ООО «БСВТ – новые технологии», Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ГНУ «Научно-исследовательский экономический институт Министерства экономики», Минск, Республика Беларусь

Лазерные гироскопы (ЛГ) являются основным элементом бесплатформенных инерциальных навигационных систем [1], занимающих устойчивое место в высокотехнологичном сегменте современного мирового рынка. Чувствительным элементом цифрового малогабаритного лазерного гироскопа (далее ЦМЛГ) [2] является кольцевой лазер (КЛ), в резонаторе которого генерируются две встречные волны (по и против часовой стрелки). Сигнал их биений (формируемый сбивающей призмой и регистрируемый фотоприемником) несет информацию о вращении КЛ вокруг оси чувствительности, перпендикулярной плоскости резонатора. В идеале, набег фазы сигнала биений пропорционален углу поворота КЛ. При этом должно соблюдаться условие подстройки периметра КЛ на резонанс, т. е. на центр контура усиления. В противном случае, при отстройке от резонанса, возникает сдвиг частоты биений, регистрируемый как погрешность гироскопа в виде постоянного смещения скорости его вращения.

Стабилизацию периметра резонатора КЛ обычно обеспечивают с помощью пьезокорректоров – пьезоэлектрических пластин, напряжение

на обкладках которых изменяет их толщину и, соответственно, положение закрепленных на них зеркал кольцевого резонатора. Обычно конструкция КЛ включает два пьезокорректора периметра, что позволяет уменьшить перекос резонатора в процессе его перестройки и стабилизации.

Для контроля положения на контуре усиления КЛ часть генерируемого излучения каждой из встречных волн выводится из резонатора на фотоприемники, сигнал с которых характеризует интенсивность генерации этих волн и являются сигналом обратной связи системы стабилизации периметра (ССП). СПП формирует тестовый сигнал модуляции напряжения на пьезокорректоре и, детектируя сигнал от фотоприемника интенсивности, формирует изменение постоянной составляющей напряжения на пьезокорректоре.

Основным фактором изменений длины периметра КЛ является процесс теплового расширения моноблока резонатора.

Данный процесс обычно достаточно медленный, поэтому электронный блок управления пьезокорректором может быть сравнительно маломощным и не быстродействующим.

Скорость перестройки периметра определяется выходным током драйвера пьезокорректора (ДПК) и емкостью обкладок управляющей пьезопластины. Повышение быстродействия ДПК влечет за собой рост его тока потребления и, соответственно увеличение потребляемой мощности.

В ЦМЛГ питание ДПК производится от встроенного источника напряжения 150В. Парафазный выход ДПК позволяет изменять знак напряжения на обкладках пьезопластины, так что диапазон прикладываемых управляющих напряжений составляет от минус 150 В до плюс 150 В. Это позволяет перестраивать резонатор КЛ в пределах 4...5 контуров усиления при типичном коэффициенте перестройки периметра 50...60 Вольт/Доплер (рисунок 1).

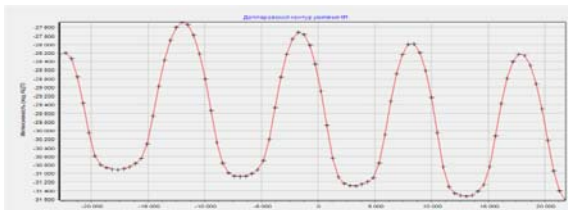


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности генерации от периметра резонатора КЛ

На оси абсцисс рисунка 1 представлены коды 16-разрядного ЦАП, управляющего ДПК, а на оси ординат – коды АЦП, выполняющего оцифровку выходного сигнала преобразователя тока-напряжение, на вход которого поступает ток фотоприемника интенсивности генерации. На краях диапазона работы ДПК имеется существенная нелинейность данной зависимости, поэтому его рабочий диапазон обычно ограничивается.

Ток потребления каждого из двух ДПК составляет 0,8 мА, что обеспечивает постоянную времени работы ПК порядка 100 мс.

Полезной функцией стартового сканирования периметра является экспресс диагностика возможных неисправностей ЦМЛГ.

Например, при отказе высоковольтного блока питания, замыкании обкладок пьезопластин или неисправности фотоприемника интенсивности при сканировании кодов управляющего ЦАП ДПК вместо гладких контуров усиления наблюдается «рваная» зависимость с изменением измеренных показаний интенсивности в узком диапазоне значений (рисунок 2).

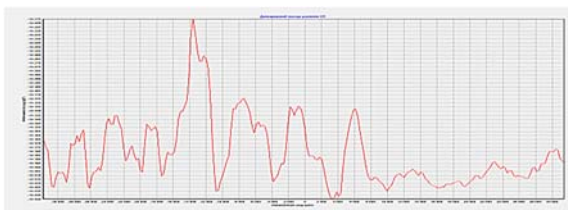


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности генерации от периметра резонатора КЛ, полученная при неисправном фотоприемнике

Деградация активной газовой среды, нарушение ее равноизотопности из-за утечек гелия и/или выработки геттера на катоде, поглощающего примеси, прогорание зеркал резонатора, появление на них пылинок, перекосы резонатора также характерно проявляются на зависимости интенсивности генерации от периметра резонатора (рисунки 3-4).

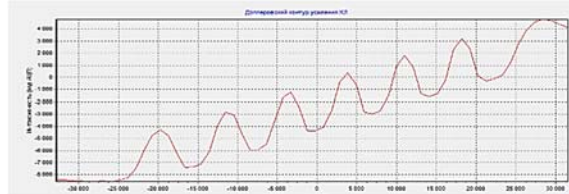


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности генерации при значительном перекосе резонатора под действием пьезопластин ДПК

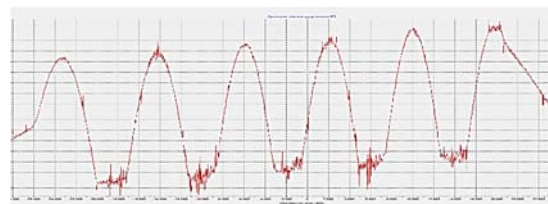
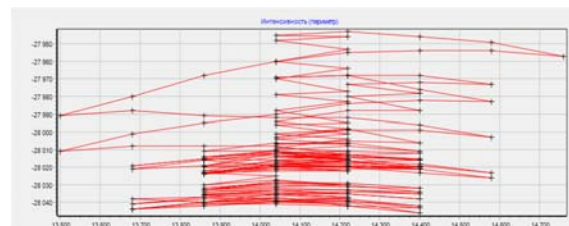
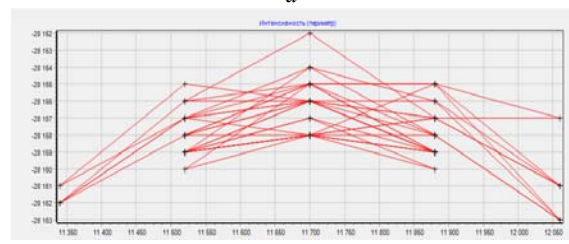


Рисунок 4 – Проявление эффектов конкуренции встречных волн в КЛ

Быстрое сканирование периметра резонатора КЛ на стартовом участке работы ЦМЛГ позволяет определить положение максимумов на контуре усиления КЛ и расстояние между ними. Это позволяет далее выполнить «отскок» на максимум усиления в рабочем диапазоне. В то же время следует учитывать возможный наклон зависимости, чтобы избежать попадания на максимум, находящийся на краю рабочего диапазона (на рисунке 4 – на правой границе), поскольку в этом случае изменения температуры резонатора быстро приведет к насыщению системы стабилизации периметра.



а



б

Рисунок 5 – Графики «шагов» ССПв рабочем режиме настройки максимум для ошумленного четного (а) и гладкого нечетного (б) контуров усиления

На графике (рисунок 4) заметно различие режимов генерации для четных и нечетных волн. 2-й, 4-й и 6-й максимумы значительно ошумлены, что выдвигает требование выбора рабочей точки на 1-м, 3-м или 5-м максимуме. Другой проблемой для системы стабилизации периметра в данном случае (ССП) (в отличие от гладкой зависимости на рисунке 1) является наличие множества экстремумов, как на максимумах контура усиления, так и между ними, что приводит к «зависаниям» между соседними контурами усиления или «блужданиям» рабочей точки вблизи максимума (рисунок 5а), что снижает точность измеряемых угловых показаний в сравнении с работой на гладком неошумленном контуре усиления (рисунок 5б).

Таким образом, использование «интеллектуального» микроконтроллерного управления ССП позволяет учесть ряд особенностей изготовления и настройки КЛ и обеспечить повышение его точностных характеристик.

#### Литература

1. Зуйков И.Е., Кривицкий П.Г., Оксенчук И.Д. Адаптивная бесплатформенная инерциальная навигационная система. Пятый белорусский космический конгресс 25–27 октября 2011 года. Материалы конгресса. Том 2. – ОИПИ НАН Беларуси, Минск – С. 247–251.
2. Кривицкий П.Г., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д. Цифровой малогабаритный лазерный гироскоп. Материалы 9-й МНТК «Приборостроение-2016». – Мн. : БНТУ, 2016. – С. 82–83..

УДК 614.842

### ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ МОДУЛЕМ ПОРОШКОВОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Кицак А.И., Есипович Д.Л., Челедюк Е.С.

*Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**Введение.** Технология тушения пожара по площади модулем порошкового пожаротушения (МПП) заключается в том, что огнетушащий порошок, выбрасываемый под высоким давлением из МПП, направляется в очаг пожара на поверхность горения. По выходе из МПП огнетушащая среда представляет собой струеподобную газопорошковую смесь (ГПС) вытесняющего газа и частиц порошка, движущихся практически с одинаковой скоростью. С увеличением расстояния от выходного отверстия МПП происходит удаление вытесняющего газа из струи вследствие его расширения и проникновение в свободные каналы порошковой среды окружающего воздуха и встречных нагретых потоков газовых продуктов горения.

Под действием этих факторов появляется горизонтальная составляющая скорости частиц порошка, приводящая к расширению струи, и происходит постепенное торможение движения частиц. Вследствие снижения скорости частиц порошка часть из них может не достичь поверхности горения, и не будет участвовать в тушении пожара.

На данный момент отсутствует методика оценки влияния мощности пожара на эффективность его тушения МПП. Разработка ее позволила бы существенно снизить финансовые затраты при проектировании модульных установок порошкового пожаротушения на проведение огневых испытаний МПП для определения их пневмозагрузочных параметров, обеспечивающих эффективное тушение пожара заданной мощности.

Целью работы является разработка методики численной оценки энергетических параметров очага пожара, который может быть потушен модульной установкой порошкового пожаротушения с заданными техническими характеристиками при тушении пожара по площади.

**Динамика характеристик движения ГПС в открытом пространстве на пути к очагу пожара.** Условная схема тушения пожара МПП представлена на рисунке 1.

На схеме изображен модуль порошкового пожаротушения 1, расположенный на некотором фиксированном расстоянии от очага пожара, и сам очаг пожара 2.

Определим скорость ансамбля частиц порошка, находящихся в элементарном слое ГПС объемом  $dV$ , движущимся в потоке нагретого воздуха тепловой колонки очага пожара. Будем предполагать, что плотность частиц порошка в выделенном слое однородна по его площади, а скорость частиц одинакова по горизонтальному сечению ГПС.

На выделенный ансамбль частиц в объеме  $dV$  действуют: сила тяжести  $\vec{F}_T$ , направленная вертикально к Земле; сила Архимеда  $\vec{F}_A$ , направленная противоположно силе тяжести; сила сопротивления воздуха  $\vec{F}_B$ , направленная в сторону, противоположную вектору скорости частиц порошка; подъемная сила  $\vec{F}_H$  потока теп-

лового воздуха тепловой колонки очага возгорания, направленная противоположно направлению вектора скорости частиц порошка.

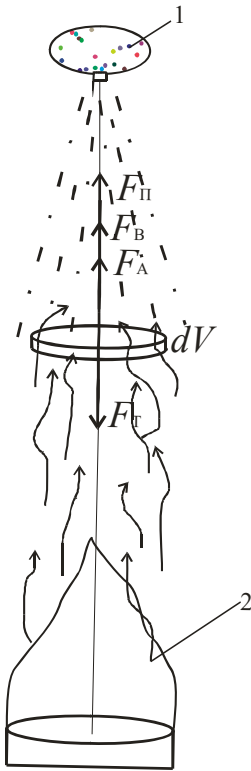


Рисунок 1 – Схема тушения пожара МПП

Уравнение движения частиц порошка в слое ГПС объемом  $dV$  в заданный момент времени  $t$  под действием сил, приложенных к нему, запишется в виде:

$$G_{\text{гп}}(t)\Delta t = G_{\text{гп}}(t)\Delta t v_h \frac{dv_h}{dh} = \vec{F}_\tau + \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_n \quad (1)$$

где  $G_{\text{гп}}(t)$  – массовый расход ГПС за единицу времени, кг/с;  $\Delta t$  – элементарный интервал времени выброса порошка, с;  $a$  – ускорение частиц порошка, м/с<sup>2</sup>;  $v_h$  – скорость частиц порошка на расстоянии  $h$  от выходного отверстия МПП, м/с.

Подставляя в уравнение (1) найденные ранее в работе [1] зависимости для модулей сил, действующих на ансамбль частиц в объеме  $dV$ , получим с учетом приближений, принятых в этой же работе, и направлений действий сил следующее уравнение движения ансамбля частиц

$$v_h \frac{dv_h}{dh} = g - 2,34 \frac{\rho_{\text{нг}} v_h^2}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon} d_{\text{отв}} \rho_{\text{п}}} - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{T_{\text{в}} c_{\text{п}} G_{\text{гп}}(t)} g \quad (2)$$

В формуле (2)  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{нг}}$  – плотность нагретых газов, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность частиц порошка, кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon$  – порозность порошка,  $d_{\text{отв}}$  – диаметр выходного

отверстия МПП, м;  $Q_{\text{пож}}$  – мощность тепловыделения, Вт;  $\chi$  – коэффициент теплопередачи в строительные конструкции,  $c_{\text{п}}$  – удельная изобарная теплоемкость нагретого газа, Дж/кг К.

Решение данного уравнения относительно  $v_h$  при начальном условии  $v_h(h=0) = v_0(t)$  ( $v_0(t)$  – скорость ансамбля частиц порошка на выходе МПП в заданный момент времени  $t$ ) имеет вид:

$$v_h = (cb^{-1}(1 - \text{Exp}[-bh]) + v_0^2(t)\text{Exp}[-bh])^{1/2}, \quad (3)$$

где

$$c = 2g \left( 1 - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{T_{\text{в}} c_{\text{п}} G_{\text{гп}}(t)} \right), \quad b = 4,68 \frac{\rho_{\text{нг}}}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon} d_{\text{отв}} \rho_{\text{п}}}.$$

Полученное соотношение (3) позволяет оценить скорость частиц порошка элементарного слоя ГПС, выброшенных из МПП в момент времени  $t$  с начальной скоростью  $v_0(t)$ , на различных расстояниях  $h$  от выходного отверстия МПП при заданных пневмо-загрузочных параметрах МПП, известных дисперсных характеристиках частиц порошка и прогнозируемых энергетических параметрах пожара.

**Оценка предельных энергетических параметров очага пожара, который может быть потушен модульной установкой порошкового пожаротушения с заданными техническими характеристиками при тушении пожара по площади.** Как упоминалось ранее, эффективность тушения пожара по площади зависит от скорости частиц огнетушащего порошка. При торможении движения частицы до скорости, равной нулю, она переходит в состояние витания (во взвешенное состояние), состоящее в колебательном ее движении возле заданного уровня. Под действием конвективных тепловых потоков пожара такие частицы могут быть выброшены из зоны горения, и не будут принимать участие в тушении пожара.

Условие равенства нулю скорости частиц огнетушащего порошка, примененное к уравнению (3), может быть использовано для оценки мощности пожара  $Q_{\text{пож}}^*$ , при котором частицы огнетушащего порошка, выбрасываемые из МПП с заданными пневмо-загрузочными характеристиками, переходят на определенном расстоянии от его выходного отверстия в состояние витания.

Величина  $Q_{\text{пож}}^*$  при этом определяется выражением:

$$Q_{\text{пож}}^* = T_{\text{в}} c_{\text{п}} G_{\text{гп}} \left( 1 + \frac{v_{\text{сп}}^2 b \text{Exp}[-bh]}{2g(1 - \text{Exp}[-bh])} \right), \quad (4)$$

где  $v_{\text{сп}}$  – среднее (за время истечения) значение скорости частиц огнетушащего порошка на вы-

ходе МПП,  $G_{cp}$  – среднее (за время истечения) значение массового расхода огнетушащего порошка,  $h$  – расстояние, отсчитываемое от выходного отверстия МПП, на котором частицы огнетушащего порошка переходят в состояние витания.

Выражение (4) можно использовать для оценки мощности пожара, который может быть потушен МПП с заданными эксплуатационными параметрами. Найденное из (4) значение  $Q_{пож}^в$  определяет границу мощностей, ниже которой пожары с мощностью, меньшей  $Q_{пож}^в$ , могут быть потушены данным МПП, поскольку частицы огнетушащего порошка в этом случае будут достигать поверхности горения, и принимать участие в его тушении. Параметр  $h$ , входящий в (4), при этом можно считать условной высотой крепления МПП.

УДК 681

### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРОВАНИЕМ В СИСТЕМАХ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Костина Г.А., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Самарина А.В., Кондратьева Н.К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Введение. Системы сканирующей зондовой электрометрии на основе зонда Кельвина находят применение в практике неразрушающего контроля однородности распределения параметров рабочих слоев полупроводниковых пластин [1]. В случае сканирования пластины диаметром 200 мм и шагом сканирования, например, 1 мм требуется регистрация и обработка 40 тысяч отсчетов. Поэтому основным требованием, предъявляемым к данным системам, является их быстродействие. В работе рассмотрен алгоритм управления сканированием, обеспечивающий повышение производительности за счет измерений при прямом и обратном ходе зонда Кельвина, а также возможные режимы передачи измерительной информации на хост-компьютер для последующей обработки.

Характеристика процесса. Процесс сканирования реализуется путем координатного перемещения предметного столика с закрепленным на нем образцом (рис. 1) в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Перемещение выполняют приводы с шаговыми двигателями. В момент отсчета приводы приостанавливаются. Область и шаг сканирования определяет оператор по средствам пользовательского интерфейса, в зависимости от задачи сканирования.

Также при восстановлении из массива измерительных данных визуализированных двух- и/или трехмерных карт распределения параметров рабочих слоев полупроводниковой пластины используется метод сплайн-интерполяции или бикубическая интерполяция, обеспечивающие интерполяцию в окрестности отсчета. Вычислительные алгоритмы

### Заключение

Полученные результаты могут быть использованы при решении задач проектировании модульных установок порошкового пожаротушения для определения пневмо-загрузочных параметров МПП по известным техническим характеристикам применяемого огнетушащего вещества.

### Литература

1. Кицак А.И. Оценка скорости частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при поверхностном способе тушения модульной установкой порошкового пожаротушения импульсного типа // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация, 2018. – № 1(43). – С. 73–120.

при этом позволяют одновременно обрабатывать измерительные данные, что в случае небольшого количества измерительных точек обеспечивает высокую скорость обработки. При этом вывод обработанных данных в виде визуализированного изображения требует периодического (по мере поступления информации) обновления рабочего поля пользовательского интерфейса.

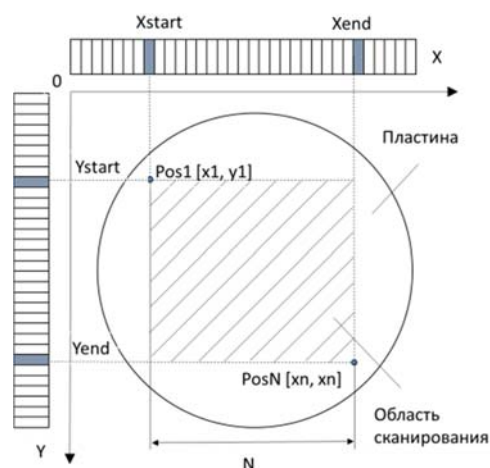


Рисунок 1 – Схема процесса сканирования

В случае контроля больших поверхностей (~ 200×200 мм) и визуализации распределения измеряемых параметров в режиме реального времени без задержки на время интерполяции требуются значительные ресурсы вычислительной машины. В этом случае наибольшее быстродействие алгоритмов обработки данных будет достигнута при

передаче измерительной информации не после каждого отсчета, а по строкам сканирования. В данной работе также предложено управление режимами передачи измерительных данных в зависимости от измерительной задачи (рисунок 3): 1 – по точкам, 2 – по строкам и 3 – передача данных одним файлом по завершению сканирования.

Базовый алгоритм сканирования (рис. 2). В соответствии с рис. 1, сканирование начинается с позиции ( $X_{START}$ ,  $Y_{START}$ ).

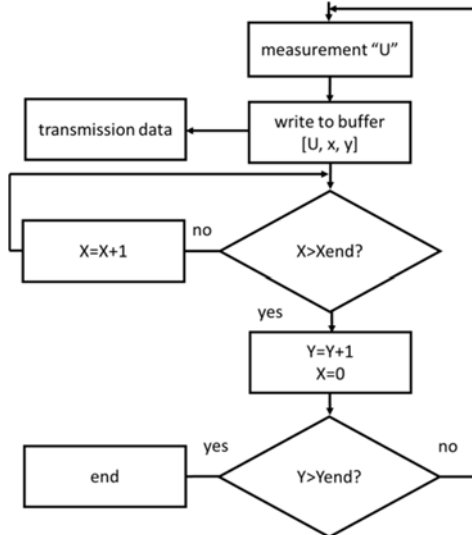


Рисунок 2 – Базовый алгоритм сканирования

После отсчета, привод производит перемещение предметного столика относительно измерительного зонда по оси координат OX на один шаг, т. е. ( $x_0+1$ ). При прохождении ряда линейки OX и достижения позиции  $x_{END}$  привод возвращает предметный столик в позицию  $x_0$ , и производит перемещение по оси OY на один шаг, т. е. ( $y_0+1$ ). При прохождении всех позиций линеек OX и OY процесс сканирования считается завершенным.

Недостатком базового алгоритма являются холостые пробеги вследствие необходимости возвращения зонда в начало линейки OX.

Алгоритм сканирования при прямом и обратном ходе. Другим вариантом сканирования является измерение при прямом и обратном ходе, т.е. при прямом ходе по завершению линейки OX предметный столик перемещается в положение ( $x_{END}-1, y_0+1$ ). Тем самым исключаются холостые пробеги и, следовательно, повышается производительность измерений. Блок схема данного алгоритма приведена на рис. 3. Алгоритм включает управление параметрами сканирования, блок реализации измерительного процесса при прямом и обратном ходе зонда, выбор режима передачи измерительных данных на хост-компьютер для последующей обработки и визуализации. Блоки «Измерение U», «Запись в буфер [u, x, y]» и «Передача данных» здесь представлены в виде черного ящика, подробнее в [2].

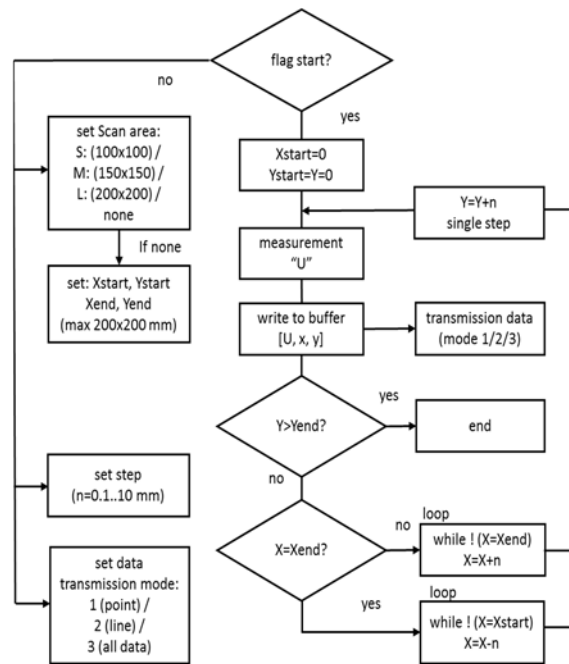


Рисунок 3 – Алгоритм управления сканированием при прямом и обратном с выбором режима передачи измерительных данных на хост-компьютер

При установке параметров сканирования, в части выбора области сканирования, предусмотрено использование параметров по умолчанию, соответствующих типоразмерам полупроводниковых пластин диаметрами 100 мм (Small: 100x100), 150 мм (Medium: 150x150) и 200 мм (Large: 200x200). В случае нестандартных параметрах необходимо указать начальные ( $X_{START}$ ,  $Y_{START}$ ) и конечные ( $X_{END}$ ,  $Y_{END}$ ) координаты, при этом линейные размеры поля не должны превышать 200x200 мм. На данном этапе должен быть задан шаг сканирования и один из трех режимов передачи измерительных данных на компьютер (1 – по точкам, 2 – по строкам или 3 – все данные по завершению сканирования). Процесс сканирования не начнется пока не будут заданы все параметры сканирования.

Моделирование и проверка процессов выполнены на языке Groovy в среде IntelliJ IDEA.

### Литература

1. Филипенко В.А., Солодуха В.А., Филипеня В.А., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электротомии. Приборы и методы измерений. 2017;8(4):344-356.

2. Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тявловский А.К., Жарин А.Л. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов. Приборы и методы измерений. 2016;7(2):136-144.

УДК 620.179.1+534.1

**ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СТРУКТУРОСКОПИИ ЧУГУНОВ****Баев А.Р.<sup>1</sup>, Майоров А.Л.<sup>1</sup>, Бабук Е.П.<sup>2</sup>, Асадчая М.В.<sup>1</sup>, Жаворонков К.Г.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>ОАО «Минский автомобильный завод»-управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ» Минск, Республика Беларусь

Повышение надежности и достоверности структуроскопии чугунов требует дальнейшего совершенствования различных методов неразрушающего контроля, где лидирующее положение занимают акустические методы контроля, основанные именно на объемном зондировании объекта упругой модой. В настоящее время наиболее информативным параметром, коррелирующим с их физико-механическими свойствами является скорость объемной волны – продольной ( $C_L$ ) и (в меньшей степени) поперечной ( $C_T$ ). Повышение точности измерений и расширение номенклатуры контролируемых чугунных изделий разных марок и геометрии требует совершенствования методик акустических измерений и повышение их точности.

С этой целью в настоящей работе проведен анализ предложенных схем возбуждения-приема упругих волн и акустических устройств для контроля физико-механических характеристик чугунов марки СЧ 20, даны рекомендации, а также представлены некоторые данные о взаимосвязи скорости упругих мод с твердостью  $B_r$  и временным сопротивлением разрыва образцов  $\sigma_r$  преимущественно марки СЧ 20. На рисунке 1 приведена одна из простых, но эффективных схем прозвучивания с помощью прибора типа ИЧ (разработка ИПФ НАН Б) для отбраковки высокопрочного чугуна от серого теневым способом нашедшая применение на предприятиях как в РБ, так и за рубежом. При этом величину скорости продольной волны определяют по формуле:  $= L(t_0 - \Delta t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2)^{-1}$ , где  $\Delta t$  – поправку на временную задержку, создаваемую акустическим контактом ( $\Delta t_1$ ), дифракцию ( $\Delta t_1$ ), а также волноводным эффектом ( $\Delta t_2$ ) – в результате суперпозиции информативного акустического сигнала и отраженного от боковых стенок детали. Измерения проводят, используя статистические данные обработке известных результатов и введением программной обработки измерений.

Как легко показать, наиболее высокая погрешность измерений  $C_L$  может быть при контроле объектов с малой толщиной и отрицательным радиусом кривизны контактной поверхности  $R$ , а с другой стороны – достаточно длинными, но ограниченными в поперечном сечении размерами. Т.е., при определении оптимальных условий измерений необходим анализ направленности поля излучения  $\Phi_{II}(\alpha, \theta)$  и поля

приема  $\Phi_{II}(\alpha', \theta')$ , т.к. функция прохождения акустического импульса

$$N \sim K_{II} K_{II} \Phi_{II}(\alpha, \theta) \Phi_{II}(\alpha', \theta'), \quad (1)$$

где  $K_{II}$  и  $K_{II}$  – коэффициенты передачи упругих волн от преобразователя к объекту и обратно, соответственно. При этом все из указанных множителей зависят не только от длины звукопровода, но и от кривизны контактных поверхностей объекта. В частности, если радиус контактной поверхности объекта  $R < 0$ , поперечный размер рабочей излучающей или приемной поверхности преобразователя  $d$ , а минимальная толщина детали  $h$ , то дополнительная относительная погрешность измерений из за отсутствие учета кривизны объекта  $\delta^* \sim 0,5 C_L d^2 (C_L^*)^{-1}$ , где  $C_f$  – скорость волны в контактной жидкой среде.



Рисунок 1 – Пояснение к схеме отбраковки высокопрочного чугуна от серого теневым методом

Для расширения технических возможностей и повышения точности измерений нами предложено использовать разноапертурные пьезопреобразователи (рис 2), позволяющие управлять ближней и дальней зоной прозвучивания. производительность и точность измерений

При этом если пренебречь особенностями прохождения УЗК в звукопроводе такого преобразователя, то его ближняя зона  $\sim d^2/\lambda$ , а угловое расхождение акустического луча в материале объекта  $\omega \sim \arcsin(\lambda/d_i)$ , где  $\lambda$  – длина волны в чугуне. В данном случае обе поверхности звукопроводов (или временных задержек), лежащие оппозитно поверхности пьезопластины расположены на одинаковом расстоянии. Т.е. с помощью одной пары преобразователей представляется возможным реализовать три-четыре схемы прозвучивания, обеспечив не только существенное расширение



ние номенклатуры контролируемых изделий, но повысить надежность и точность измерений.

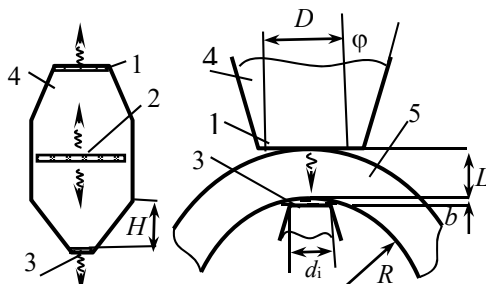


Рисунок 2 – Двухапертурные ПЭП для структуроскопии чугунов: 1 и 3 – рабочие поверхности звукопровода, 3 – звукопровод, 4 – пьезопластина, 5 – объект контроля

Отметим, что для уменьшения шумового фона в звукопроводах преобразователя угол наклона  $\varphi$  образующей конусной поверхности к акустической оси выбирают из условия  $\text{arctg}[(R_0 - d/2)/h_0] \geq \varphi \geq \pi/4$ , где  $R_0$  – радиус цилиндрической части звукопровода,  $h_0$  – высота усеченного конуса звукопровода.

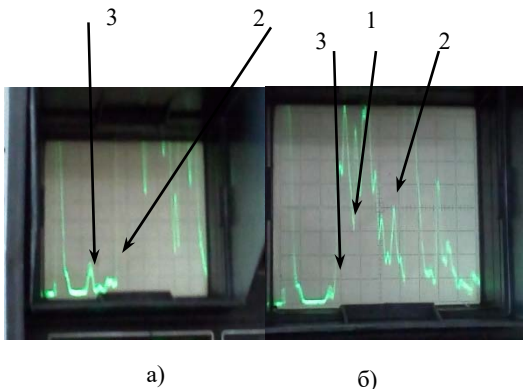


Рисунок 3. – Характерные осциллограммы ПЭП, работающего в раздельно-совмещенном режиме на образцах из стали (а) и серого чугуна (б): 1 – сигнал шумового фона (1) и донного отражения (2), 3 – сигнал акустического пролаза;  $f=5$  МГц

В случае, когда возможно только одностороннее прозвучивание объекта, то для измерения  $C_L$  были разработаны устройства, основанные на прозвучивании объекта подповерхностной продольной волной с использованием двух призматических и двух малоапертурных преобразователей. Последние используются только для приема волн, излучаемых с противоположных сторон призматическими преобразователями. При этом представляется в 2-3 раза повысить точность измерения скорости волны. Учитывая результаты нашей работы, выполненной по проекту БРФФИ Т13-159, где были обнаружено влияние структуры стальных образцов материала на амплитуду поверхностной волны, принимаемых движущимся ЭМА-преобразователем (~7-8 дБ и

более), а также результаты работы [2], была рассмотрена возможность диагностирования структуры чугунов с помощью предложенного в последней работе раздельно-совмещенного режима прозвучивания поверхности. При этом в качестве мощных рассеивателей поверхностной волны служили именно включения пластинчатого графита. Осциллограммы сигнала, при работе такого ПЭП (рисунок 3) указывают на принципиальную возможность качественной оценки структуры чугунов достаточно простым методом. При апробации такой методики на образцах чугунов марки СЧ20 на рабочей частоте 5 МГц было обнаружена тенденция уменьшения шумового фона, создаваемого рассеянием поверхностной волны с ростом прочности и твердости образцов. Предполагается, что использование метода структурных шумов позволит повысить надежность структуроскопии чугунов, а в некоторых случаях упростить ее.

Интересные результаты по изучению влияния твердости и временного сопротивления на скорость продольной волны в таких же образцах чугуна с пластинчатой структурой приведены на рисунке 4. Эти данные свидетельствуют о возможности использования акустического метода для отбраковки достаточно широко используемого чугуна марки СЧ20.

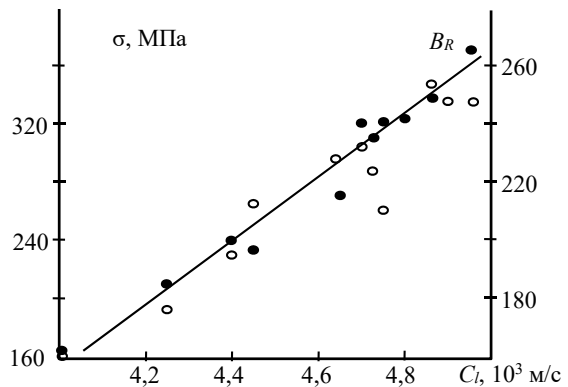


Рисунок 4 – Зависимость твердости (●) и временного сопротивления (○) от скорости продольной волны в чугуне СЧ20

#### Литература

1. Баев А.Р., Асадчая М.В. Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах. Часть 1. Волны в объектах с плоской свободной границей. – Дефектоскопия. – 2005. – №9. – С.19-31.
2. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Дедов А.И., Байтеряков А.В. Контроль структурного состояния сталей с помощью акустических шумов. – Приборы и методы измерений. – 2014 – №3. – С. 35-45.

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 006.91:533.2(083.76)(045)(476)

**ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ СОСТАВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ,  
ВЫПУСКАЕМЫЕ БЕЛОРУССКИМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ИНСТИТУТОМ МЕТРОЛОГИИ**

**Ананьин В.Н., Мирончик А.М., Мохнач М.В.**

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

Выпуск государственных стандартных образцов (ГСО) состава газовых смесей в Республике Беларусь осуществляет с 1998 года Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии» (БелГИМ) в форме единичного повторяющегося производства по техническим условиям Республики Беларусь [1–2].

Основой метрологического обеспечения выпуска ГСО состава газовых смесей являются национальные эталоны Республики Беларусь в области газового анализа, метрологические характеристики которых подтверждены результатами международных сличений [3, 4].

Разработка и изготовление ГСО состава газовых смесей в Республике Беларусь регламентируются техническими нормативными правовыми актами [5–9], методическими указаниями [10].

Компетентность БелГИМ в области изготовления стандартных образцов состава газовых смесей подтверждена свидетельствами QSF-R40 и QSF-R41 о соответствии международным стандартам ISO/IEC 17025 и ISO Guide 34, а также сертификатом № ВУ/112 05.01.002 00235 о соответствии системы менеджмента качества изготовителя стандартных образцов требованиям [11].

ГСО состава газовой смеси представляет собой смесь одного или более сертифицируемых компонентов ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , углеводороды  $C_1$ – $C_7$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $CH_3SH$ ,  $C_2H_5SH$  и др.) с газом-разбавителем (воздух синтетический,  $N_2$ ,  $He$ ,  $Ar$ ,  $CH_4$  и др.), находящуюся в баллоне под давлением от 0,15 МПа (рассчитывается с учетом давления насыщенных паров конденсируемых компонентов газовой смеси) до 4,9 МПа, максимально – до 9,8 МПа.

Сертифицированное значение – содержание сертифицируемого компонента (компонентов) – может быть выражено в молярных или объемных долях (% ,  $млн^{-1}$ ), или как массовая концентрация ( $мг/м^3$ ). Диапазон значений молярной (объемной) доли сертифицируемого компонента (0,0001–99,9) %; относительная неопределенность сертифицированного значения (10–0,2) %. При необходимости пересчет данных о составе ГСО в другие единицы измерения (из молярных процентов в объемные, из объемных процентов в  $мг/м^3$  и т. д.) производится по [12].

ГСО приготавливают в баллонах Заказчика из исходных чистых газов. Состав исходных уста-

навливается анализом при входном контроле или по документации изготовителя.

Подготовка приемных баллонов к заполнению ГСО проводится путем вакуумирования при температуре от 80 °С до 120 °С до остаточного давления не более 10 Па.

ГСО получают путем последовательного дозирования в подготовленные приемные баллоны исходных газов из баллонов в количествах, полученных предварительным расчетом.

Однородность состава приготовленных ГСО обеспечивается путем вращения баллонов с ГСО на рольганге (ускоренная гомогенизация), или за счет естественной гомогенизации (не менее 24 ч).

После завершения процесса гомогенизации ГСО проходят приемо-сдаточные испытания, в ходе которых устанавливается содержание сертифицируемого компонента (компонентов) и проверяется на соответствие техническим условиям:

- маркировка и упаковка;
- герметичность баллона;
- давление газовой смеси;
- отклонение содержания сертифицируемого компонента (компонентов) от номинального значения.

По способу сертификации (установления значений параметров) ГСО состава газовых смесей можно разделить на 2 основных типа:

- 1) ГСО, сертифицированные гравиметрическим методом;
- 2) ГСО, сертифицированные аналитическим методом.

В первом случае ГСО приготавливают методом статических парциальных давлений, включающим:

- расчет парциальных давлений наполнения для каждого дозируемого компонента с учетом заданного состава смеси, допустимого давления, применимого к газам, с учетом возможной конденсации, максимального рабочего давления используемого баллона, установленного состава каждого компонента;

- дозирование компонентов смеси в приемный баллон в порядке возрастания парциальных давлений на установках смешивания газов с цифровыми манометрами DPI104 класса точности 0,05;

- установление массы каждого введенного компонента по разности масс приемного баллона до и после дозирования с помощью масс-компараторов (ССЕ40КЗ, наибольший предел взвешивания 41 000 г, дискретность 2 мг или

КА10-3/P, наибольший предел взвешивания 15 000 г, разрешение 1 мг).

Сертификация ГСО осуществляется гравиметрическим расчетом по [10] исходя из масс исходных газов, дозированных в приемный баллон, их состава, а также молярных масс всех компонентов смеси.

Расчет парциальных давлений наполнения и окончательный расчет состава ГСО производится с помощью разработанной в БелГИМ программы GasVes.

Верификация (проверка состава) ГСО проводится аналитическими методами по [11] и/или МВИ, утвержденным в установленном порядке, с использованием для градуировки аналитического оборудования эталонных (калибровочных) газовых смесей (ЭКГС), изготовленных и сертифицированных на оборудовании национальных эталонов НЭ РБ 13-04, НЭ РБ 16-08, НЭ РБ 18-10.

Указанным методом приготавливают двух- и многокомпонентные (до 14 компонентов) ГСО 0-го разряда, в частности, имитаторы природного газа. Емкость приемного баллона до 10 дм<sup>3</sup> ограничивается рабочим диапазоном используемого масс-компаратора.

**Во втором случае** приготовление ГСО также осуществляется методом статических парциальных давлений, а сертификация – аналитическими методами по [11] и/или МВИ с использованием для градуировки аналитического оборудования ЭКГС или калибровочных газовых смесей, приготавливаемых из ЭКГС динамическим объемным методом с помощью системы разбавления газов Environics S4040.

Этим методом приготавливают ГСО 1-го и 2-го разрядов, что составляет большую часть выпускаемой продукции. Это ГСО, содержащие промышленно важные газы (СО, СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>, О<sub>2</sub>, Аг, Не и др.), ГСО, содержащие компоненты сжиженных углеводородных газов (С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>, n-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>, i-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>, n-С<sub>6</sub>Н<sub>14</sub> и др.), а также ГСО, содержащие вещества, загрязняющие атмосферный воздух (NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>SH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>SH и др.). При этом могут использоваться баллоны объемом от 2 до 40 дм<sup>3</sup>.

Выпускаемые ГСО сопровождаются сертификатами, в которых указываются сертифицированное значение содержания компонента (компонен-

тов) и расширенная неопределенность (погрешность) сертифицированного значения, установленная при разработке данного типа ГСО, и сведения о метрологической прослеживаемости.

#### Литература

1. ТУ РБ 100055197.002-2000 Образцы стандартные состава газовых смесей.
2. ТУ ВУ 100055197.009-2014 Образцы стандартные сертифицированные состава газовых смесей.
3. Ананьин, В.Н. Метрологическое обеспечение газоаналитических измерений / В.Н. Ананьин, А.М. Мирончик, М.В. Мохнач // Приборостроение-2016 : материалы 9-й МНТК. – Минск: БНТУ. – 2016. – С. 150–151.
4. Ананьин, В.Н. Международные сличения национальных эталонов в области газоаналитических измерений / В.Н. Ананьин, А.М. Мирончик, М.В. Мохнач, С.С. Скакун // Приборостроение-2017: материалы 10-й МНТК. – Минск : БНТУ. – 2017. – С. 120–121.
5. ТКП 8.005-2012 (03220). Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Стандартные образцы. Основные положения. Порядок разработки, утверждения, регистрации и применения.
6. ГОСТ ISO Guide 34-2014. Общие требования к компетентности изготовителей стандартных образцов.
7. ГОСТ ISO Guide 35-2015. Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации).
8. СТБ ИСО 6142-2003. Анализ газов. Приготовление калибровочных газовых смесей. Гравиметрический метод.
9. СТБ ИСО 6143-2003. Анализ газов. Методы сравнения для определения и проверки состава газовых смесей для калибровки.
10. МИ 1952-88 ГСИ. Стабильность стандартных образцов состава веществ и материалов. Методика оценки.
11. СТБ ISO 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
12. СТБ ИСО 14912-2006. Анализ газов. Преобразование данных о составе газовой смеси.

УДК 621.3.016.2.08(045)(476)

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ Баенская Е.А., Силич В.В., Ярмолович М.А.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

Современный этап развития электроэнергетики в Республике Беларусь характеризуется ограниченными собственными топливно-энергетическими ресурсами, но наряду с этим это одна из отраслей, обеспечивающих стабильные эко-

номические показатели в формировании экономики страны.

Функционирующий в Республике Беларусь Национальный эталон единицы электрической мощности был создан и исследован в период

с 1999 г. по 2001 г., а в 2004 г проходила его модернизация, которая позволила расширить измерительные возможности данного эталона. Таким образом, можно сделать вывод, что составные части данного комплекса средств измерений имеют моральный и технический износ, что означает, что, проводимые измерения не удовлетворяют потребностям, возникающим на данном этапе развития энергетической отрасли в Беларуси.

Так же изменился ряд нормативно-правовых актов применяемых в странах СНГ в области энергетики, что в свою очередь является определяющим фактором для внесения изменений в существующий состав эталона. Данные выводы и привели к необходимости проведения модернизации.

Необходимость заключается в потребности более точного измерения и воспроизведения электрических величин, характеризующих процесс производства, передачи и распространения электрической энергии, во внедрении высокоточных электронных средств измерения напряжения, тока, мощности, частоты переменных сигналов, в повышении объёмов оказанных услуг по поверке (калибровке) средств измерений. Так же, наряду с данными вопросами, рассматривается возможность проведения автоматизации процесса измерения и обработки полученных результатов.

Исходя из общепринятых в метрологии методов повышения точности измерений физических величин, можно отметить два принципиальных, но дополняющих друг друга, пути повышения точности измерения и расширения диапазонов измерения.

Первый путь – технологический, основанный на тщательном выборе средств измерений (компараторов, цифровых измерителей и т. д.), обеспечении работы данных приборов в оптимальных по точности диапазонах измерений, в освобождении средств измерений от избыточных нагрузок, защите приборов от влияния температурных перепадов, постоянного и переменного магнитных полей и др.

Технологический путь обычно связан с заметными материальными затратами, в ряде случаев затруднен в своей реализации (например, длительного время прогрева после включения), однако тем не менее должен применяться в рамках своих возможностей.

Технологический путь повышения точности измерений традиционно применяется в электроэнергетике стран СНГ при учете электроэнергии.

Второй путь – структурный, основанный на методах автоматической компенсации погрешностей, введении поправок в результаты измерений на действие систематических погрешностей и др.

Структурный путь требует предварительных измерений параметров, а затем – диагностирование погрешностей и других метрологических характеристик на местах эксплуатации (определение математического ожидания систематиче-

ских погрешностей, законов их изменения и др.). Однако после этого он позволяет более эффективно (в 5–10 раз), чем технологический путь, добиться повышения точности измерений и достоверности учета электроэнергии.

Структурный путь повышения точности измерений широко применяется в измерительной технике. В электроэнергетике стран СНГ при учете электроэнергии он до сих пор не нашел своего применения.

По имеющимся данным, структурный путь повышения точности измерений электроэнергии применяется в электроэнергетике США, Великобритании и других развитых стран.

В основном в нашей стране модернизация заключается в замене изношенного как физически, так и устаревшего морально оборудования, что обеспечивается внедрением собственных разработок, отвечающих современным тенденциям развития, либо закупкой уже имеющихся на рынке разработок иностранного производства.

Национальный эталон единицы электрической мощности № НЭ РБ 14-04 в соответствии с межгосударственной поверочной схемой находится на уровне вторичного эталона и является комплексом средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и хранение единицы электрической мощности и значений коэффициента мощности с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме эталонным средствам измерений. В настоящее время используется специализированный высокостабильный трехфазный источник фиктивной мощности (ИФМ) и комплекс средств, обеспечивающих синхронное измерение мгновенных значений напряжения и силы тока (выборки) на выходах ИФМ с последующим накоплением и математической обработкой массивов накопленных выборок. Однако такая реализация ограничивает диапазоны измеряемых величин характеристиками источника фиктивной мощности.

Внешний вид, состав эксплуатируемого комплекса приведен на рисунке 1, а технические и метрологические характеристики приведены в таблице 1.



Рисунок 1 – Внешний вид национального эталона единицы электрической мощности

Эталон состоит из комплекта следующих средств измерений:

- источники напряжения и силы переменного тока:
  - ✓ источник Calsource 200;
  - ✓ калибратор Fluke 5520A-PQ;
  - ✓ калибратор Fluke 6100A;
- измерители напряжения, силы тока, активной, реактивной и полной мощности:
  - ✓ компаратор электрической мощности однофазный K2005;
  - ✓ компаратор электрической мощности трехфазный K2006;
  - ✓ мера электрической мощности RD 33-211;
  - ✓ измеритель Calport 300;
  - ✓ измеритель PWS 3.3.

Можно отметить, что существующий эталон Республики Беларусь уступает существующим в других странах по измерительным возможностям, а наилучшим среди данных средств измерений является Государственный первичный эталон единицы электрической мощности, разработанный в ФГУП «ВНИИМ им. Д.М. Менделеева».

Таблица 1 – Метрологические характеристики средств измерений входящих в состав Национального эталона

| Наименование метрологических характеристик          | Значения метрологических характеристик |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Диапазоны воспроизведения:                          |                                        |
| – напряжения, В                                     | 0,001 – 1008                           |
| – тока, А                                           | 0,029 – 1000                           |
| – мощности, Вт                                      | $29 \cdot 10^{-9}$ – $10 \cdot 10^5$   |
| – частоты, Гц                                       | $10$ – $30 \cdot 10^3$                 |
| Диапазоны измерения:                                |                                        |
| – напряжения, В                                     | 5 – 600                                |
| – тока, А                                           | 0,001 – 100                            |
| – мощности, Вт                                      | $0,03$ – $6 \cdot 10^5$                |
| – частоты, Гц                                       | 15 – 70                                |
| Расширенная неопределенность измерения, ppm         | 150-300                                |
| СКО случайной погрешности, S                        | $1 \cdot 10^{-4}$                      |
| Неисключенная систематическая погрешность, $\Theta$ | $1 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-4}$  |

На данный момент, в рамках выполнения заданий подпрограммы «Эталон Беларуси» ГНТП «Эталон и научные приборы» 2016-2020 гг., главной задачей стоит модернизировать эталон для обеспечения воспроизведения, измерения и передачи единицы электрической мощности с метрологическими характеристиками, представленными в таблице 2.

Таблица 2

| Наименование метрологических характеристик              | Значения метрологических характеристик    |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Диапазон воспроизведения и измерения напряжения         | от 0,001 до 1000 В                        |
| Диапазон воспроизведения и измерения силы тока          | от $29 \cdot 10^{-6}$ до 1000 А           |
| Частотный диапазон                                      | от 0,01 до 30 кГц                         |
| Среднее квадратическое отклонение результатов измерений | от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ |

Модернизация эталона будет реализована на принципиально новом методе измерения электрической мощности. Принцип действия ВЭТ основан на аналого-цифровом преобразовании мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока в цифровые коды, из которых формируются массивы оцифрованных выборок, с последующим вычислением значений измеряемых величин из полученного массива данных. Метод измерения активной электрической мощности состоит в интегрировании произведения синхронных отсчетов мгновенных значений напряжения и тока по периоду частоты их основной гармоники.

Разрабатываемый эталон – это комплекс технических средств, включающий:

- источник фиктивной мощности на основе программируемого генератора-синтезатора сигналов переменного напряжения и тока, усилителя тока, усилителя напряжения и понижающего трансформатора напряжения;
- первичные измерительные масштабные преобразователи напряжения и тока (делитель напряжения и комплект шунтов);
- два синхронизированных аналого-цифровых преобразователя (АЦП) мгновенных значений сигналов напряжения и тока на основе мультиметра Agilent 3458A;
- прецизионный источник опорной частоты для синхронизации АЦП эталона и АЦП поверяемых СИ на основе генератора сигналов произвольной формы;
- системы управления, обработки и представления информации на основе персонального компьютера (ПК), реализующая с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) функции вычисления значений измеряемых величин, приема и обработки результатов измерений поверяемых
- (калибруемых) СИ, а также вычисления погрешностей этих СИ.

Дополнительно в составе эталона могут использоваться:

- приёмник сигналов спутниковой навигационной системы (шкала UTC) для синхронизации и формирования временного кода (информации о текущих значениях времени) и передачи этих данных оборудованию эталона;
- преобразователь «ПТНЧ» для реализации проверки СИ электрической энергии с импульсным выходным устройством методом сравнения частот.

Принципиальная схема разрабатываемого комплекса показана на рисунке 2.

Использование синхронизированной системы измерений напряжений и силы тока позволит расширить частотный диапазон, повысить точность измерений. Используемое при этом специализированное программное обеспечение, позволит полностью автоматизировать процесс измерений.

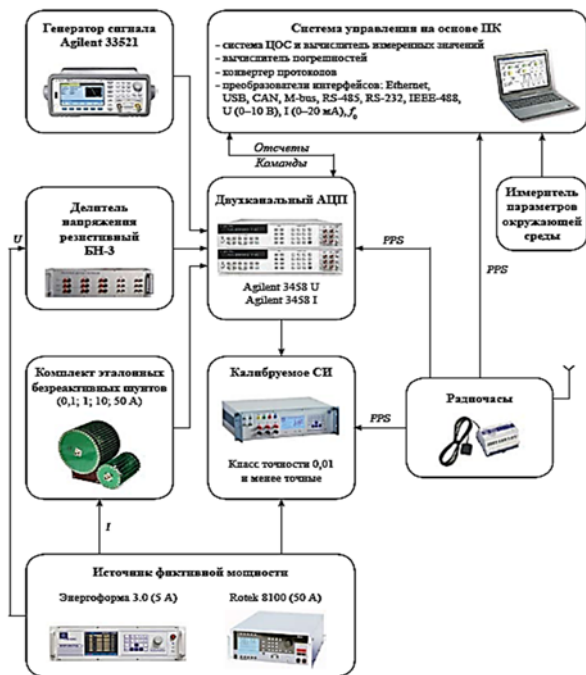


Рисунок 2 – Структурная схема ВЭТ

Кроме того, в мире ведутся новые разработки в области реализации измерений электрической мощности с использованием системы синхронизации измерений мгновенных значений напряжения и силы тока с последующей математической обработкой накопленных данных, а так же работы по созданию и метрологическому обеспечению multifunctional digital centers (АСКУЭ), предназначенных для удаленного комплексного контроля состояния трехфазных и однофазных электрических сетей. Кроме того, опробована синхронизация измерений с UTC и поддержка протокола IEC 61850-9-2LE (перспективные СИ для создания интеллектуальных электрических сетей). Операции воспроизведения единицы электрической мощности выполняются в автоматическом режиме с использованием специализированного ПО.

УДК 621.38

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА РЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУРАХ

Батурин А.П., Терещенко Н.Ф.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

По количеству смертей в мире – уверенно лидируют заболевания сердца и кровеносной системы. Распространенность сердечно-сосудистых заболеваний определяет актуальность разработки новых и эффективных компьютерных технологий для их диагностики, лечения и прогнозирования, то есть для оценки функционального состояния системной гемодинамики и жидких сред

Большое внимание уделяется также развитию методического обеспечения измерения и воспроизведения мощности. Будет разработан соответствующий комплект нормативно-правовой документации, позволяющий использовать данный комплекс измерительного оборудования в Республике Беларусь.

### Литература

1. Гублер Г.Б., Шапиро Е.З., Никитин А.Ю. Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2012 Журнал «Измерительная техника» N1, 2016, стр. 3–7.
2. Величко О.Н. Оценка неопределенности при калибровке рабочих эталонов коэффициента мощности на государственном эталоне единиц электрической мощности и коэффициента мощности / О.Н. Величко, С.Р. Карпенко, В.Н. Гачок // Системи обробки інформації. – 2013. – № 3(110). – С. 157–160.
3. Гиниятуллин И.А., Гублер Г.Б., Никитин А.Ю., Шапиро Е.З. Многофункциональный вторичный эталон единиц электрической мощности «ВЭТ-МЭ 1.0» Метрология – измерения – учет и оценка качества электрической энергии. Сборники докладов конференции 6–10 июня 2016 г.С.Петербург, стр 9–19.
4. Арловская, Л.С. Исследование метрологических характеристик национального эталона электрической мощности / Л.С. Арловская, А.П. Белошицкий, М.А. Ярмолович // Новые направления развития приборостроения : материалы 9-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 20–22 апреля 2016 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 2. – С. 172.
5. Национальный эталон единицы электрической мощности [Электронный ресурс]. – <http://www.belgim.by/1436>.

функциональная диагностика использует прямые и косвенные методы оценки состояния сердечно-сосудистой системы [1].

Реография аорты и легочной артерии широко используется в клинической практике для количественного анализа значений параметров правого и левого желудочков сердца, который оценивает сократительную функцию миокарда [1]. Увеличенный интерес физиологов и врачей к косвенным методам исследования кровенаполнения органов человека свидетельствует об актуальности реографии. Но на достоверность полученных реограмм влияет воздействие внешних факторов – температура среды, электромагнитные поля и акустические колебания.

Оценка влияния на действительные значения полученных реограмм в среде действия ультразвуковых колебаний посвящена данная работа.

На сегодняшний день используется большое количество методов, чтобы обеспечить эффективную диагностику функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Перспективным направлением разработана оптимальных способов и средств реографии при воздействии внешних факторов ультразвука.

Поэтому задачей данной работы является экспериментальное исследование оценить реографические показатели под действием ультразвука.

К сегодняшнему дню сложилась более-менее признанная методика проведения реографических исследований и структура описательной части заключения [1], включает оценку уровня кровенаполнения сосудов исследуемого региона, оценку тонуса на уровне артерий распределения и артерий сопротивления, возможно, оценку эластичности сосудов, уровня периферического сопротивления, состояния венозного оттока и т. д.

Для оценки уровня кровенаполнения обычно используется амплитуда реосигнала.

Для более предметного дальнейшего рассмотрения остановимся кратко на простейшей модели участка тела, например верхней конечности, при продольной реографии.

Представим простейшую модель участка тела в виде четырех параллельно соединенных резисторов, один из которых моделирует сопротивление магистральных артерий при диастолическом давлении  $P_d$ .

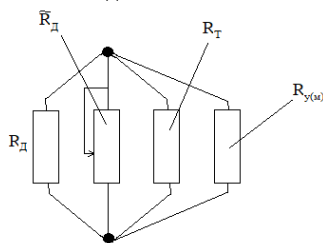


Рисунок 1 – Модель участка тела человека

$$R_A = p_k \frac{L_A}{S_A}$$

где  $p_k$  – удельное сопротивление крови,  $L_A$  – длина участка тела между потенциальными электро-

дами,  $S_A$  – площадь поперечного сечения артерии,  $R_{y(m)}$  – сопротивление, возникающее в результате действия ультразвуковых или магнитных полей.

При такой модели амплитуда реографического сигнала будет равняться разнице итогового сопротивления (т. е. сопротивление четырех параллельно соединенных резисторов) при диастолическом давлении  $P_d$  и результирующее сопротивление при давлении  $P_c$ .

$$\delta R_{Amax} = ((R_d - R_c) \cdot k_{впл}) = \left( \frac{p_k^2 L_A \delta S_{Amax}}{p_k S_A^2} \right) \cdot k_{впл} \quad (1)$$

Как видим, амплитуда реосигнала действительно определяется величиной максимального изменения поперечного сечения артерии  $\delta S_{Amax}$ , а значит, кровенаполнение, но, кроме этого, она зависит от расстояния между потенциальными электродами  $L_A$ , эластичности и тонуса артерии (так как  $\delta S_{Amax}$  зависит от эластичности и тонуса тоже), зависит от квадрата поперечного сечения тела  $S_A^2$ , зависит от сердечного выброса и от коэффициента влияния ультразвука или магнитного поля  $k_{впл}$ .

$$\frac{\delta S_{Amax}}{S_T} = \frac{\delta R_{Amax}}{R_{ZA}} \cdot k_{впл} \quad (2)$$

Очевидно, что кровоснабжение региона должно определяться массой тканей этого региона, поэтому давление  $\delta S_{Amax}$ , на  $S_T$  можно рассматривать как попытку приведения  $\delta S_{Amax}$  до какого-то стандарта для уменьшения зависимости от конкретной области установки электродов,  $k_{впл}$  – коэффициент влияния ультразвука или магнитного поля. По всей видимости, этот параметр можно вполне использовать в реографии для оценки кровенаполнения конечностей, его использовали Kunert! (1961) и Lifshitz (1970), но и в нем остается зависимость от величины сердечного выброса.

Следующие параметры, которые обычно определяются при стандартной методике исследования, это эластичность и тонус сосудов различного уровня.

Л.Б. Иванов вполне справедливо пишет о сложности разграничения этих двух характеристик сосудов, но нам кажется, что было бы полезно все таки определять и эластичность и тонус, поскольку эластичность определяет степень сохранения свойств стенок сосудов, а тонус – функциональное состояние сосудистого русла в данный момент времени и в данных условиях.

Рассмотрим простейшую модель исследуемого участка сосудистой системы, в которой эластичные свойства большой артерии отобразим в виде некоторой емкости  $C_1$ , инерционность массы крови между артерией и следующими средними и мелкими артериями представим в виде индуктивности  $L_{KP}$ , эластичные свойства средних и мелких артерий представим в виде емкости  $C_2$ , и, наконец, периферическое сопротивление – в виде некоторого активного сопротивления  $R_{пер}$ .

СОК – систолический объем кровотока за период  $T$ .

Для определения СОК можно использовать либо методику сжатия вены и оценки прироста кровенаполнения вены за период, или совместную обработку реосигналов исследуемой артерии и аорты.

В первом случае для определения СОК воспользуемся соотношением:

$$СОК = y \frac{\rho_k L^2 \delta R_{СОК}}{R_{zA}^2} \cdot k_{впл}, \quad (3)$$

$L$  – расстояние между потенциальными электродами;  $\delta R_{СОК}$  – прирост сопротивления между потенциальными электродами при перетиснутой вене за период;  $R_{zA}$  – базовое сопротивление, соответствующее моменту определения значения  $\delta R_{СОК}$ ;  $y$  – коэффициент, учитывающий соотношение полного объема исследуемого участка сосудистой системы и объема между потенциальными электродами;  $k_{впл}$  – коэффициент влияния ультразвука или магнитного поля.

В последнее время в медицине все больше используют физиотерапевтическое действие, основанную на использовании энергии ультразвука.

Был проведен эксперимент, во время снятия реограмма у пациента, на сосуды было влияние ультразвука от  $0,1 \text{ Вт} / \text{см}^2$  до  $1,0 \text{ Вт} / \text{см}^2$ .

Эксперимент показал при местном воздействии ультразвука скорость потока крови увеличивается, кровенаполнение органов, пульс. На рис. 2 показана реограмма в нормальных условиях

и реограма под воздействием ультразвука, видно изменение графиков в амплитуде, так как при воздействии ультразвука кровенаполнения сосудов и органов растет, и в свою очередь электроды реографа фиксируют эти изменения и на реограме видно, что амплитуда изменилась.

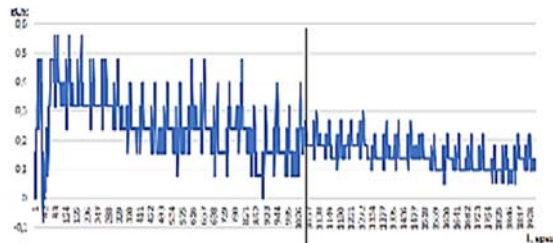


Рисунок 2 – Результаты реограммы

На основе проведенных экспериментов измерения сопротивления кровотоку участка руки, установлено, что под воздействием ультразвука значение сопротивления уменьшилось, по сравнению с измерениями без внешнего воздействия, это показано на графике.

#### Литература

Батурин А.П., Терещенко Н.Ф. Влияние ультразвука на изменения реографических характеристик // Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й МНТК молодых ученых и студ. 18-20 апреля 2018 г. / Минск, БНТУ, 2018. – 497 с., С. 7.

УДК 53.082.53

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АЛЬБЕДО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПРОФИЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Бручковская С.И., Беляев Ю.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

В период с 01.08.2018 по 19.09.2018 в районе аэродрома «Зябровка» при различных условиях выполнялись спектрометрические измерения коэффициента отражения земной поверхности при помощи малогабаритного прибора «ССП-600 Н» в диапазоне 400-900 нм, а также измерения оптических характеристик аэрозоля в диапазоне 400–500 нм. Внешний вид прибора «ССП-600 Н» представлен на рис. 1.

Кроме того, производилась квазисинхронная съемка земной поверхности при помощи аналогичного по конструкции прибора [1] с борта легкого самолета в диапазоне 400–900 нм. Прикладной задачей являлась отработка методик наземных измерений для полетных калибровок оптических приборов. Работы выполнялись специалистами НИИПФП в рамках реализации научных мероприятий с использованием новых технических средств белорусской разработки.



Рисунок 1 – «ССП-600 Н» в режиме регистрации спектра подстилающей поверхности

Методы проведения дистанционных калибровок оптических приборов используют модели переноса излучения, которые, в свою очередь, требуют достоверной информации о поглощающей способности атмосферы и альbedo подстилающей поверхности в месте проведения изме-



рений, что и определило актуальность данной работы.

В рамках данной работы предлагается метод определения профиля поглощения аэрозоля с использованием информации об альбедо подстилающей поверхности. Суть метода состоит в том, что:

1. На первом этапе в районе предполагаемых полетных калибровок производится наземная регистрация спектров подстилающей поверхности и молочного стекла, на основании которых рассчитывается альбедо подстилающей поверхности.

2. Далее производятся измерения спектров рассеянного солнечного света под различными углами к горизонту, из которых методом DOAS [2] получаются наклонные толщ димера кислорода.

3. Последняя задача решается при помощи модели переноса излучения в атмосфере. При этом минимизируется разница между измеренной наклонной толщиной димера кислорода и рассчитанной в модели путем подбора соответствующего профиля аэрозольного оптического поглощения. В качестве неизменного параметра модели выступает измеренное на первом шаге альбедо подстилающей поверхности.

Предложенный метод был опробован на данных натурных измерений, проведенных при помощи прибора «СП-600 Н», в районе аэродрома «Зябровка». Краткие промежуточные результаты по всем трем этапам метода и их описание представлены ниже.

1. В процессе регистрации спектров подстилающей поверхности применялся объектив, который формирует поле зрения около  $5^\circ$  для того, чтобы захватить большую площадь, и сменный красный фильтр КС-11 для подавления вторых порядков дифракции. Для измерения реперного спектра применялось молочное стекло, которое устанавливалось на место исследуемой поверхности. На рисунке 2 представлен пример альбедо травяного покрова.

2. Измерения спектров рассеянного солнечного света производились для 11 углов возвышения ( $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ), время экспозиции выбиралось 200 мс, после чего регистрировался темновой спектр. Углы возвышения устанавливались вручную при помощи предварительно откалиброванного электронного уровня ProDigitMicro (точность установки угла  $\pm 0.2^\circ$ ) и поворотной платформы с микрометрическим винтом. Применялся согласованный объектив для уменьшения поля зрения до  $1^\circ$  и синий фильтр СС-5. Полученные спектры обрабатывались методом DOAS [2] при помощи программного продукта QDOAS с целью восстановления дифференциальных наклонных толщ столкновительного комплекса кислорода  $O_2-O_2$  (димер кислорода). При этом использовались сечения поглощения и настройки как в [5].

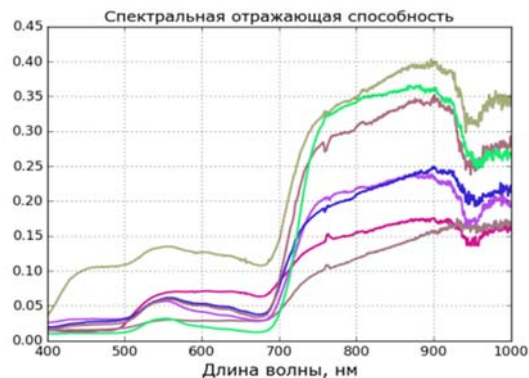


Рисунок 2 – Пример: альбедо различных трав

Пример решений системы DOAS-уравнений для димера кислорода представлен на рисунке 3.

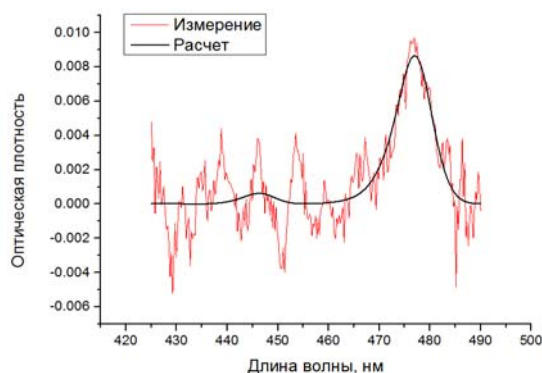


Рисунок 3 – Восстановление наклонной толщи димера кислорода в диапазоне 425–490 нм

3. Далее использовался итерационный алгоритм PriAM [4], который использует метод Левенберга-Марквардта применительно к модели переноса излучения SCIATRAN с целью подбора подходящего профиля аэрозольного поглощения так, чтобы минимизировать разницу между измеренными и смоделированными дифференциальными наклонными толщинами димера кислорода. Альбедо поверхности принималось равным 0.05. Восстановленный профиль аэрозольного поглощения представлен на рисунке 4.

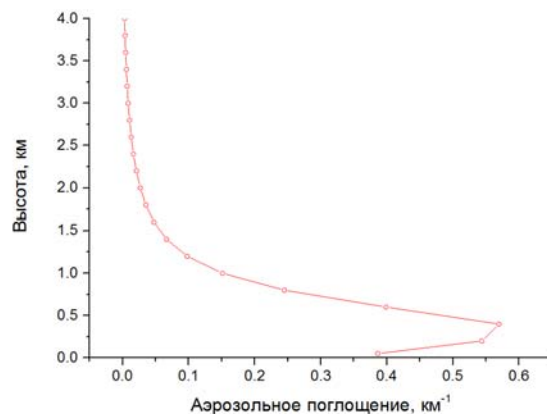


Рисунок 4 – Профиль аэрозольного поглощения для длины волны 450 нм

**Выводы:**

- идея метода восстановления свойств аэрозоля, описанного в работе [3], была впервые применена к данным измерений малогабаритного спектрометра «ССП-600 Н» с FWHM = 4.5 нм;
- предлагаемый метод восстановления свойств аэрозоля отличается от предложенного в работе [3] тем, что в модели переноса излучения дополнительно используются данные об альбедо подстилающей поверхности;
- установка углов возвышения в ручном режиме приводит к увеличению времени регистрации серии спектров в сравнении с автоматической.

**Литература**

1. Разработка комплекса наземной спектральной аппаратуры для обеспечения полетных калибровок спутниковых съемочных систем / Б.И. Беляев [и др.] / 6 Белорусский космический конгресс: материалы конгресса. В 2 т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – Т.1. – С. 234–237.

2. Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy Principles and Applications / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 597 p.

3. Frieß, U., P.S. Monks, J.J. Remedios, A. Rozanov, R. Sinreich, T. Wagner, and U. Platt (2006), MAX-DOAS O<sub>4</sub> measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols: 2. Modeling studies, J. Geophys. Res., 111, D14203, doi:10.1029/2005JD006618.

4. Wang, Y., Lampel, J., Xie, P., Beirle, S., Li, A., Wu, D., and Wagner, T.: Ground-based MAX-DOAS observations of tropospheric aerosols, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and HCHO in Wuxi, China, from 2011 to 2014, Atmos. Chem. Phys., 17, 2189-2215, 2017.

5. Бручковский И.И., Светашев А.Г., Демин В.С., Бородко С.К., Аникин П.П., Красовский А.Н. Предварительная обработка спектров для анализа по методу дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии // Журнал БГУ. Физика. – 2018. – № 2. – С. 86–96.

УДК 621.317.026.08(045)(476)

**ИЗМЕРЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ОЖИДАНИЯ**

**Волков А.Н.<sup>1</sup>, Крышнёв М.М.<sup>1</sup>, Киселёв М.Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Энергопотребление в режиме ожидания составляет существенную статью коммунальных расходов. Электроприборы, выключенные с помощью пульта дистанционного управления или не выполняющие своих основных функций, а также электронные устройства, питающиеся от внешнего источника, потребляют энергию в режиме ожидания. Объем потребляемой энергии в режиме ожидания одного устройства незначителен, варьируется в основном до 2 Вт, но количество таких устройств растет с каждым днем.

К перечню оборудования, работающего в режиме ожидания, относятся стиральные машины, электрические плиты, микроволновые печи, видеокамеры, телевизоры, звуковые усилители, домашние кинотеатры и другие бытовые приборы.

Функции, выполняемые оборудованием, подразделяют на основные и второстепенные. Основные функции связаны с первичным назначением прибора. К второстепенным относятся:

- дистанционное управление мощностью до включения рабочей нагрузки;
- вторичное управление нагрузкой (автоматическое отключение, задержка начала или задержка отключения);
- наличие датчиков: движения, температуры, расхода воды и др.;
- отображение информации на дисплее;
- функции памяти и таймера;

– зарядка батарей (там, где это не является основной функцией);

– применение фильтров электромагнитной совместимости (ЭМС) и т. д.

Второстепенные функции рассматриваются как отдельная часть основной нагрузки (или основной функции). Второстепенные функции в некоторых конфигурациях должны обеспечивать небольшое потребление энергии. В некоторых второстепенных функциях может применяться отдельный выключатель для отключения от сети электропитания при некоторых режимах работы приборов.

Требования к измерениям потребляемой мощности в режимах с низким потреблением энергии устанавливаются в следующих стандартах:

- СТБ 2248-2012 Оборудование электрическое бытовое и офисное. Показатели и методы измерения энергопотребления в режимах ожидания и выключения;
- СТБ ИЕС 62301-2012 Электроприборы бытовые. Измерение потребляемой мощности в режиме ожидания;
- СТБ 2463-2013 Источники питания внешние. Энергетическая эффективность. Требования к потреблению электроэнергии в режиме холостого хода и среднему эффективному КПД.

Режимы с низким потреблением энергии можно разделить на следующие группы:

- режим выключения;
- режим ожидания;
- сетевой режим.

Режим выключения представляет собой режим работы прибора, потребляющего энергию, подключенного к сетевому источнику питания и не обеспечивающего выполнения какой-либо функции в режиме ожидания, сетевом режиме работы или активном режиме, при этом режим работы является продолжительным. Индикатор, который указывает только на то, что прибор выключен, относится к режиму выключения.

Режим ожидания представляет собой режим работы прибора, потребляющего энергию, подключенного к сетевому источнику питания и обеспечивающего выполнение одной либо нескольких функций:

- включение других режимов работы посредством дистанционного переключателя, встроенного датчика, таймера;
- отображение информации на дисплее, включая датчик времени;
- использование различных датчиков.

Сетевой режим – режим работы прибора, потребляющего энергию, подключенного к сетевому источнику питания, при котором активируется, как минимум, одна сетевая функция (повторное включение посредством сетевой команды, сообщение о целостности сети), но основная функция не является активной.

Потребляемую мощность в режиме ожидания определяют следующими методами:

– метод выборки: с использованием измерительного прибора для регистрации измерений потребляемой мощности через равные промежутки времени на протяжении всего периода измерения. Метод выборки является предпочтительным при измерении потребляемой мощности для всех режимов работы и типов приборов.

Данный метод используют в случае, когда мощность является нестабильной (циклической или неустойчивой) или режим работы имеет ограниченный временной интервал. Он также представляется самым быстрым методом испытания, если режим работы является стабильным.

– метод усредненных данных: если значение мощности является стабильным и режим работы тоже стабилен, посредством усреднения показаний прибора при измерении потребляемой мощности в течение установленного периода времени или посредством регистрации потребляемой энергии в течение установленного временного интервала и деления этого значения на значение временного интервала;

– метод непосредственного считывания показаний измерительного прибора: если значение мощности является стабильным и режим работы тоже стабилен, то посредством регистрации показания потребляемой мощности измерительным прибором.

Метод с использованием измерительного прибора прямого считывания можно использовать только тогда, когда режим работы не изменится и показание потребляемой мощности, отображаемое на дисплее измерительного прибора, является стабильным.

Энергопотребление оборудования не должно превышать значений, установленных соответствующими стандартами.

Энергия – это средняя мощность, умноженная на время. Электроэнергию обычно выражают в ватт-часах или киловатт-часах. Энергию также можно выражать в джоулях. Один ватт равен номинальному потреблению энергии в 1 Дж/с. 1 кВт·ч равен 3,6 МДж. Для преобразования мощности в энергию (для расчета годового потребления энергии) количество часов работы в каждом режиме работы должно допускаться для данного периода и должна быть известна средняя мощность для каждого режима работы. Так как большинство приборов может работать во многих режимах, а диаграммы и профили использования могут отличаться в значительной степени в различных странах, преобразование значений мощности в значения энергии может быть весьма затруднительно.

В отношении прибора, имеющего только один режим работы, можно преобразовывать мощность в значение годового потребления энергии путем допущения постоянной мощности в течение всего года. В году 8760 ч, поэтому прибор, который имеет, например, постоянную резервную мощность 2 Вт (допуская, что в других режимах работы он не используется) будет потреблять 17520 Вт·ч в год, или 17,5 кВт·ч в год.

Годовое потребление энергии можно определять для более сложных шаблонов использования оборудования путем суммы мощности на часы использования для каждого режима в течение одного года.

При рассмотрении общего потребления энергии для более сложного прибора необходимо знать как минимум время «включения» или время активного режима работы и потребление энергии в цикле. Для некоторых приборов допускаемого количества использований (циклов) в год и режимов работы с низким потреблением энергии может быть достаточно. В более сложных приборах, в которых активный режим может значительно отличаться (например, нагреватели и кондиционеры воздуха), могут потребоваться более подробные данные. Некоторые приборы потребители могут отключать от источника питания, когда они не используются. Также может существовать несколько возможных режимов работы с низким потреблением энергии, которые могут зависеть от предпочтений потребителя или шаблонов использования.

Внедрение и разработка стандартов по энергоэффективности способствуют выпуску на рынок

продукции с низким энергопотреблением, при этом требования, предъявляемые к потребляемой энергии не должны оказывать влияния на функциональность оборудования. Требования к энергопотреблению оборудования постоянно

ужесточаются, что создает необходимость своевременного пересмотра соответствующих стандартов и установления новых норм энергопотребления оборудования с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

УДК 621

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИММИТАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ Волчѣк С.А.<sup>1</sup>, Завацкий С.А.<sup>1</sup>, Петрович В.А.<sup>1</sup>, Серенков В.Ю.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>"Белмикрoанализ" филиала НТЦ "Белмикросистемы" ОАО "ИНТЕГРАЛ"-управляющая компания холдинга "ИНТЕГРАЛ", Минск, Республика Беларусь

При производстве полупроводниковых приборов и ИМС широко используются различные технологические операции, связанные с использованием чистой воды (деионизованной), а также растворов на ее основе. В связи с этим, а также в связи с разработкой новых технологических операций в области микро- и нанoeлектроники, становится весьма актуальной задача – получение сверхчистых материалов, а также контроля свойств сверхчистых жидкостей и жидкостей, использованных в технологических операциях.

В настоящей работе приводятся результаты наблюдения одного из важнейших параметров воды – тангенса угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ). В самом общем случае применительно к любой изучаемой среде, тангенс угла потерь с точки зрения физики протекающих в объектах явлений, представляет собой соотношение двух энергий (или мощностей): в числителе должна стоять активная энергия, а в знаменателе – реактивная. Добротность этого же объекта – величина, обратная  $\text{tg}\delta$ . Характерно также, что  $\text{tg}\delta$  (добротность) описывает адекватно любой объект: проводник, полупроводник, диэлектрик, магнитный материал, колебательный контур, оптический резонатор и т. п. В более узком смысле тангенс угла потерь для диэлектрика как частный случай – это соотношение мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости; для магнитного материала – соотношение мнимой и действительной частей комплексной магнитной проницаемости и т. д.

Вода, даже сверхчистая (например фармацевическая) по известным физическим причинам диссоциирует с константой диссоциации при нормальных условиях  $10^{-7}$ . При этом сформированные ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) и ионы гидроксида ( $\text{OH}^-$ ) на фоне недиссоциировавших молекул воды обуславливают конечную величину электропроводности воды. Изучать электрическими методами степень чистоты воды, в которой дополнительно может содержаться  $10^{-7}$  и менее посторонних примесных ионов (например меди, железа и т. д.) становится весьма проблематич-

ной, практически неразрешимой задачей. И на аноде, и на катоде под действием постоянного напряжения будут реализовываться анодные и катодные процессы, неизбежно приводящие к загрязнению контролируемой воды.

Рекомендуемые ГОСТами и стандартами электродные системы для контроля свойств чистых жидкостей [1, 2] по нашему мнению требуют коррекции.

На рисунке 1, а и б представлены зависимости тангенса угла потерь от частоты измерительного сигнала (амплитуда сигнала составляла 0,7 В, использовался прибор Е7-25 производства МНИПИ РБ). Данные получены при нормальных условиях для деионизованной воды производства ОАО «Интеграл». Один график получен для платинового датчика (платина имела непосредственный контакт с водой), а другой для платины, изолированной от воды тефлоновым диэлектриком. В качестве диэлектрика может быть использован любой другой диэлектрический материал с тангенсом угла потерь 0,001 и менее. Это обусловлено тем, что  $\text{tg}\delta$  для деионизованной воды находится в пределах 0,1–3 единиц (в зависимости от частоты измерительного сигнала).

На частотной зависимости  $\text{tg}\delta$  ярко выражены максимумы, характерные для релаксационных механизмов поляризации: для изолированного от раствора датчика максимум  $\text{tg}\delta$  соответствует частоте измерительного сигнала  $10^5$  Гц, а для датчика, контактирующего с водой, соответствующая частота находится в пределах 5–7 кГц. В соответствии с теорией [3], этим максимумам соответствует энергия связи поляризующихся частиц 0,46 и 0,54 эВ соответственно. Расчет энергии активации (свободной энергии активации дипольного механизма поляризации)  $\Delta E$  осуществлялся по формуле:  $f = \frac{kT}{h} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура проведения эксперимента (300 К),  $h$  – постоянная Планка. При этом частоты, соответствующие максимумам  $\text{tg}\delta$ , отличаются примерно в 20 раз! Поэтому, с точки зрения структуры и свойств воды данные по рисунку 1, а не могут нести до-

стоверной информации. Причина – «маскирование» истинных объемных свойств воды анодно-катодными процессами, которые реализуются на границе раздела «металл-вода».

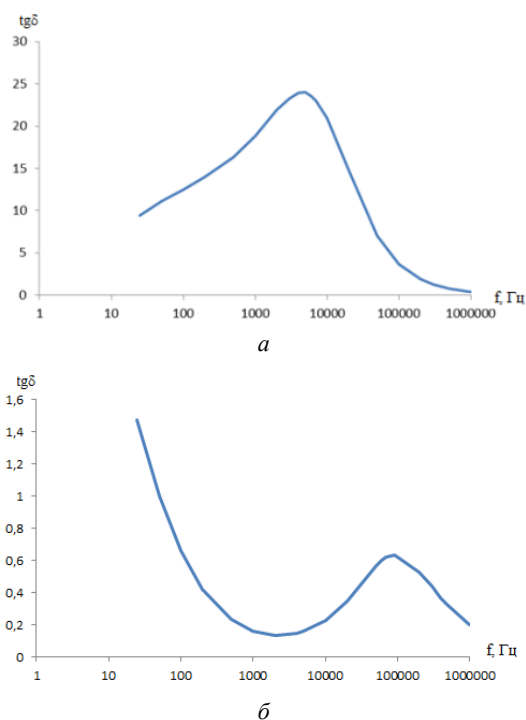


Рисунок 1 – Зависимость  $\text{tg}\delta$  от частоты измерительного сигнала для (а) Pt датчика в деионизованной воде и (б) для Pt датчика, покрытого тефлоном, в деионизованной воде

Как видно из рисунка 1, б характерно также численное значение  $\text{tg}\delta$  от 0,1 (частота 2 кГц) до 1,5 единиц (частота 25 Гц); с ростом частоты  $\text{tg}\delta$  уменьшается. Для рисунка 1, а в этом же диапазоне частот  $\text{tg}\delta$  возрастает от 9,5 единиц до 24, т. е. численное значение  $\text{tg}\delta$  на порядок больше, чем для рисунка 1, б. Здесь также просматривается маскирующее влияние анодно-катодных реакций на регистрируемое значение тангенса.

Важной иммитансной характеристикой является и набор эквивалентных сопротивлений, и емкостей для простейших схем замещения – последовательной и параллельной. В нашей работе осуществлена регистрация полного набора упомянутых величин.

Следует отметить, что при этом величина  $\text{tg}\delta$  может быть описана следующей формулой:  $\text{tg}\delta = 1/RC\omega$ , где  $\omega = 2\pi f$ . В работах [4, 5] было показано, что эта формула для  $\text{tg}\delta$  эквивалентна следующей формуле:  $\text{tg}\delta = 1/\rho\epsilon_r\omega$ , где  $\rho$  – эквивалентное удельное сопротивление,  $\epsilon_r$  – эквивалентная диэлектрическая проницаемость. Поэтому, зная, как ведет себя с изменением частоты  $\text{tg}\delta$  и, например, величина эквивалентной емкости, можно установить как ведет себя с изменением частоты величина эквивалентного сопротивления, а следовательно получить частотную зависимость эквивалентного удельного сопро-

тивления и величины эквивалентной диэлектрической проницаемости. Особые условия для возможности реализации такого анализа в текст данной работы не включены.

В случае использования датчика, материал которого находится в непосредственном контакте с водой, значение эквивалентной емкости уменьшается от величины  $10^5$  пФ (при частоте 25 Гц) до 100 пФ при частоте 1 МГц. Убыль этой емкости – монотонная, не содержащая не только максимумов, но и перегибов типа «выпуклая-вогнутая» зависимость.

В случае использования датчика покрытого тефлоном, численные значения эквивалентной емкости также убывают. Однако при частоте 25 Гц значение емкости составляет около 3000 пФ, т. е. более чем в 30 раз меньше, чем для «открытого» датчика. На частоте 1 МГц величина емкости равна 100 пФ, что также меньше, но уже только в 4 раза, чем для «открытого» датчика. Кроме этого, наблюдаются участки типа «выпуклая-вогнутая» зависимости на трех фрагментах частотной зависимости эквивалентной емкости. Причины этого связываются с поведением  $\text{tg}\delta$  (рисунок 1 а, б) и могут быть обсуждены в докладе.

#### Выводы

Рекомендуемые ГОСТами и стандартами материалы электродов для изучения свойств воды непригодны: электроды (индифферентные) анодно и катодно не взаимодействуют с водой, но при этом на них реализуется электролиз воды. Это приводит по существу к «загрязнению» воды, что недопустимо при исследовании свойств воды высокой степени чистоты. Кроме этого, информация об энергии связи поляризующихся молекул также искажается.

#### Литература

1. Национальный стандарт Российской Федерации: Жидкости изоляционные. ГОСТ Р МЭК 61620-2013, М., Стандартиформ, 2014.
2. Национальный стандарт Российской Федерации: Жидкости изоляционные. ГОСТ Р МЭК 60247-2013, М., Стандартиформ, 2014.
3. Ахадов, Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 412 с.
4. Петрович, В.А. Датчики контроля электрофизических свойств жидких диэлектриков / А.И. Кузьмич, Е.И. Раевич, В.А. Петрович, В.В. Баранов, В.Ю. Серенков // Труды XVIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 2017, с. 52–53.
5. Петрович В.А. Датчики контроля свойств смазочных масел / В.В. Баранов, И.В. Батурия, А.И. Кузьмич, В.А. Петрович, В.Ю. Серенков, Г.М. Шахлевич // Матер. 10 МНПК «Приборостроение 2017». – Минск, БНТУ, 2017, с. 100–101.

УДК 006.91

## НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ Вольнец О.А.<sup>1</sup>, Вольнец А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

Внесение в законодательные и нормативные документы требований по электромагнитной совместимости и безопасности, защите информации, охране здоровья, и соответствующая необходимость выполнения измерений уровней напряженности ЭМП привела к оснащению испытательных и калибровочных лабораторий республики разнообразными средствами измерения напряженности ЭМП в широком динамическом и частотном диапазоне. Современное состояние измерений напряженности электрического поля характеризуется следующими моментами:

1. В Российской Федерации созданы и эксплуатируются Государственный первичный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0,0003 до 1000 МГц ГЭТ 45-2011 и Государственный первичный специальный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0 до 20 кГц ГЭТ 158-96. Кроме того, созданы эталоны первого разряда, обеспечившие расширение диапазона воспроизводимой напряженности электростатического (РЭНЭП-00) и электрического поля промышленной частоты (РЭНЭП-50) до 180 кВ/м [1].

2. Существуют следующие поверочные схемы, возглавляемые государственными национальными эталонами Российской Федерации:

– Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0 до 20 кГц [2];

– Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0,0003 до 1000 МГц [3].

3 В Республике Беларусь эксплуатируется большой парк средств измерений напряженности электрического поля, работающих в диапазоне частот ниже 150 кГц (измерительные антенны, измерители напряженности электрического поля ВЕ-метр и др.), но их метрологический контроль стал возможен только после создания эталона.

Национальный эталон единицы напряженности электрического поля (далее – НЭП) разработан и создан производственно-исследовательским отделом радиоэлектронных измерений Республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии» (Республика Беларусь) совместно с Закрытым акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Циклон-Прибор» (Российская Федерация).

Эталон построен по блочному принципу. В состав эталона входят следующие блоки:

- блок генерации;
- излучающее устройство;
- блок измерительный;
- компаратор электрического поля;
- персональный компьютер с управляющим программным обеспечением.

Фотография внешнего вида эталона представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фотография внешнего вида эталона

В основу работы эталона положен метод эталонного поля. Суть метода заключается в создании однородного электрического поля в пространстве между двумя параллельными пластинами плоского несимметричного конденсатора, одна из пластин которого заземлена. Особенностью плоского конденсатора является высокая однородность электрического поля в пространстве между пластинами, что позволяет использовать его в качестве меры напряженности электрического поля.

Основные метрологические характеристики эталона приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Наименование характеристики                                                                                     | Значение                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Рабочий диапазон частот, кГц                                                                                    | от 0,005 до 400                                   |
| Диапазон воспроизводимых значений НЭП, В/м на частотах<br>(0,005...20) кГц<br>(20...100) кГц<br>(100...400) кГц | от 0,5 до 2000;<br>от 0,5 до 400;<br>от 0,5 до 40 |
| Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения и передачи единицы НЭП                                | от 3,6 % до 4,4 %<br>(P=0,99)                     |
| Доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения и передачи единицы НЭП                              | от 3,6 % до 4,4 %<br>(P=0,99)                     |
| Среднеквадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении и передаче единицы НЭП                | от 0,2 % до 0,4 %<br>(n=5)                        |

Доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения и передачи единицы НЭП эталоном в зависимости от диапазона частот воспроизводимого электрического поля составляют от 3,9 % до 4,7 % при доверительной вероятности  $P = 0,99$ .

Оценивание неопределенности измерений при воспроизведении и передаче единицы напряженности электрического поля

Функция измерений:

$$E = E_y \cdot \left( 1 + \frac{\delta_1}{100} + \frac{\delta_2}{100} + \frac{\delta_3}{100} + \frac{\delta_4}{100} + \frac{\delta_5}{100} \right)$$

где  $E$  – воспроизводимая эталоном напряженность электрического поля, В/м;

$E_y$  – показания измерительного блока эталона, В/м;

$\delta_1$  – поправка, обусловленная неравномерностью частотной характеристики эталона, %;

$\delta_2$  – поправка, обусловленная неравномерностью амплитудной характеристики эталона, %;

$\delta_3$  – поправка, обусловленная взаимодействием компаратора электрического поля с пластинами конденсатора излучающего блока эталона, %;

$\delta_4$  – поправка, обусловленная неточностью установки компаратора электрического поля (далее – КЭП) в центр рабочей зоны излучающего блока эталона, %;

$\delta_5$  – поправка, обусловленная неточностью измерений градуировочного коэффициента КЭП на государственных эталонах РФ, %.

Стандартная неопределенность по типу А и ( $E_y$ ) воспроизведения и передачи единицы НЭП по результатам проведенных исследований метрологических характеристик эталона определяется по формуле:

$$u(E_y) = \sqrt{S(\tilde{A}_1)^2 + S(\tilde{A}_2)^2 + S(\tilde{A}_3)^2 + S(\tilde{A}_4)^2},$$

где  $S(\tilde{A}_1)$  – оценка среднего квадратического отклонения результатов измерений напряженности электрического поля КЭП в положении  $0^\circ$  при определении неравномерности частотной характеристики исследуемого эталона, %;

$S(\tilde{A}_2)$  – оценка среднего квадратического отклонения результатов измерений напряженности электрического поля КЭП в положении  $180^\circ$  при определении неравномерности частотной характеристики исследуемого эталона, %;

$S(\tilde{A}_3)$  – оценка среднего квадратического отклонения результатов измерений напряженности электрического поля КЭП в положении  $0^\circ$  при определении неравномерности амплитудной характеристики исследуемого эталона, %;

$S(\tilde{A}_4)$  – оценка среднего квадратического отклонения результатов измерений напряженности электрического поля КЭП в положении  $180^\circ$  при определении неравномерности амплитудной характеристики исследуемого эталона, %;

В зависимости от диапазона частот и амплитуды воспроизводимой единицы НЭП значение стандартной неопределенности по типу А составило от 0,11 % до 0,34 %.

Расширенная неопределенность измерений при воспроизведении и передаче единицы НЭП эталоном в зависимости от диапазона частот воспроизводимого электрического поля составляет от 2,8 % до 2,9 % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ,  $k = 2$ .

Созданный эталон полностью обеспечивает метрологический контроль имеющихся в РБ средств измерений напряженности электрического поля. Основными потребителями услуг по метрологическому контролю средств измерений параметров ЭМП являются предприятия Министерства здравоохранения, Министерства связи и информатизации, Министерства промышленности, Министерства обороны РБ, Министерства внутренних дел, Комитет государственной безопасности. Дальнейшие ежегодные исследования характеристик эталона связаны с определением долговременной нестабильности коэффициента передачи излучающего устройства эталона и отождествления показаний КЭП с показаниями измерительного блока эталона и калибратора-вольтметра Н4-12 и применением риска-ориентированного подхода при метрологическом контроле характеристик эталона.

### Литература

1. Создание и совершенствование эталонной базы в области радиочастотных электромагнитных измерений. В.А. Тищенко, М.В. Балаханов, В.И. Лукьянов. – Менделеево: «ВНИИФТРИ», 2013. – 198 с.
2. ГОСТ Р 8.564-96 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0-20 кГц».
3. ГОСТ 8.560-94 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003-1000 МГц».
4. Паспорт Национального эталона единицы напряженности электрического поля.
5. Правила хранения и применения Национального эталона единицы напряженности электрического поля.

УДК 621.396.67

## К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета», Минск, Республика Беларусь*

В общем виде любой радиоголографический измерительный комплекс (ИВК) включает зондовую антенну, сканирующее устройство с драйвером управления, которые обеспечивают перемещение зондовой антенны по заданной поверхности, измерительно-регистрирующую аппаратуру, включая и питающий генератор, и канализирующие линии, обеспечивающие подачу на измеряемую антенну и зонд сигналов генератора и передачу измеряемого сигнала на измерительную аппаратуру. Каждый из перечисленных блоков вносит свою составляющую погрешности. В результате общая погрешность измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля (или восстановления характеристик измеряемой антенны расчетным путем) является суперпозицией погрешностей от нескольких источников, механизмы их возникновения имеют различную природу, различные временные характеристики и различные степени влияния на конечный результат.

Задачей проведенных исследований являлась разработка наиболее общих подходов к оценке погрешностей восстановления характеристик измеряемой антенны вне зависимости от конкретной конструкции измерительного комплекса.

Представим АФР поля, измеренного на некоторой поверхности в ближней зоне антенны в виде:

$$U(i,j) = U_0(i,j) + \Delta U(i,j), \quad (1)$$

где  $U(i, j)$  – измеренное АФР поля;  $U_0(i, j)$  – истинное АФР поля;  $\Delta U(i,j)$  – погрешности измерения АФР поля,  $i, j$  – номера отсчетов по каждой координате.

Тогда восстановленная диаграмма направленности (ДН)  $F(\varphi, \theta)$  описывается выражением:

$$F(\varphi, \theta) = F_0(\varphi, \theta) + \Delta F(\varphi, \theta), \quad (2)$$

где  $F_0(\varphi, \theta)$  – истинная ДН;  $\Delta F(\varphi, \theta)$  – погрешности восстановления ДН,  $\varphi, \theta$  – угловые координаты (азимут и угол места).

Используя свойство аддитивности интегральных преобразований из ближней зоны в дальнюю, будем считать, что  $\Delta F$  (2) есть интегральное преобразование  $\Delta U$  (1), которое представляет собой угловое распределение ошибок восстановления ДН исследуемой антенны.

Для любой конструкции измерительного комплекса величины  $i, j$  (номера отсчетов) однозначно определяют пространственное положение измерительного зонда. Таким образом, структура погрешностей  $\Delta U(i, j)$  состоит из погрешностей измерения амплитуды и фазы, вы-

званных погрешностями измерительной аппаратуры и погрешностей, вызванных погрешностями позиционирования, т. е. распределенных по пространству в пределах области измерений.

Априори будем считать, что каждая составляющая погрешностей имеет систематическую и случайную компоненты. В данной работе рассматривается влияние случайных компонентов погрешностей. В качестве методологической основы проведенной работы использовались подходы статистической теории антенн. Сложность рассматриваемой ситуации заключается еще и в том, что для анализа нам доступны только информация об измеренном поле (со всеми ошибками измерения) и результаты расчета диаграммы направленности (также со всеми ошибками). Истинной или эталонной ДН просто физически нет, поскольку нет эталонной антенны, а значит, нет и эталонного поля. Измерительные антенны типа П6-23, П6-140 и др. имеют слишком малые габариты по сравнению с размерами области измерений, чтобы рассматриваться как источники эталонного поля для нашей задачи.

### Влияние случайных погрешностей измерительно-регистрирующей аппаратуры

В режиме неподвижного зонда регистрируется массив данных (амплитуда  $A$  и фаза  $\Phi$  или квадратичные компоненты поля  $A \sin \Phi$  и  $A \cos \Phi$ ) размером  $N \times M$  ( $N$  и  $M$  – число отсчетов по каждой из координат). При этом объем массива и темп измерений выбираются соответствующими реальным измерениям. Далее рассчитываются средние значения и СКО измеренных величин, коэффициенты и радиусы автокорреляции, а также коэффициенты их взаимосвязи.

Указанная процедура проводится в нескольких точках динамического диапазона исследуемого комплекса. Полученные результаты позволяют определить реальный динамический диапазон измерительной аппаратуры, а корреляционный анализ – наличие или отсутствие дрейфовых компонент погрешностей.

Для определения погрешностей восстановления ДН формируется массив средних значений  $V_{cp} W_{cp}$  размером  $N \times M$  и в соответствии с выбранными интегральными преобразованиями рассчитывается поле в дальней зоне от сформированного массива (считая его истинной ДН  $F_0$ ) и от реально измеренного массива (считая его ДН с погрешностями  $F$ ). Проведя вычитание  $F_0 - F$ , получают пространственное распределение и относительная величина погрешностей восста-



новления  $\Delta F$  (2). При желании, комбинируя массивы средних значений и отклонений от среднего для компонент  $V$  и  $W$ , возможно отдельно проанализировать влияние, например, амплитудных и фазовых погрешностей.

#### **Комплексный анализ влияния случайных погрешностей**

Для экспресс оценки предлагается провести анализ результатов, полученных при измерениях  $P$  раз одного сечения АФР (например, одной строки и одного столбца для измерений по плоскости) в средней части АФР исследуемой антенны. В результате получаются массивы данных размером  $N \times P$  и  $M \times P$ , т. е.  $P$  реализаций одномерных массивов размерностью  $N$  и  $M$ . Статистическая и корреляционная обработка проводится в соответствии с алгоритмом, приведенном выше, но параметры определяются не по всему массиву, а лишь по  $P$  реализациям каждого отсчета.

Финальной процедурой оценки погрешности восстановления ДН антенн с использованием данного конкретного радиоголографического комплекса является определение границ разброса восстанавливаемых ДН. Для этого рассчитываются  $P$  одномерных реализаций ДН, и для каждого отсчета (углового значения ДН) выбираются средние значения, формирующие среднюю (истинную) ДН, а также максимальные и минимальные значения. По результатам таких измерений строятся кривые, определяющие границы разброса восстанавливаемых ДН для нескольких типов наиболее часто встречаемых АФР полей – синфазных равноамплитудных, со спадающим амплитудным распределением, формирующих разностный канал для монопольных режимов и др.

Анализ влияния канализирующих линий передачи сигналов на исследуемую антенну и зонд требует индивидуального подхода не только к каждому конкретному измерительному комплексу, но даже и при измерениях антенных систем различных типов на одном и том ИВК. В этих случаях возможна максимальная оценка за счет создания режимов измерения, при которых априори предполагаются максимальные искажения измеряемых значений амплитуды и фазы. Например, если конструкция ИВК предполагает использование гибких кабелей, то максимальные искажения возникнут при максимальных размерах области сканирования. Очевидно, что вносимые этим механизмом погрешности будут содержать компоненты, которые не могут рассматриваться как случайные и требуют другого алгоритма оценки.

Практическая реализация такого подхода возможна при замене исследуемой антенны и радиоканала исследуемая антенна – измерительный зонд отрезком кабеля, максимально иден-

тичного штатному по электрическим параметрам, длине и форме изгиба. В такой аппаратной конфигурации проводится цикл измерения при максимально возможной области сканирования. Обработка полученных результатов позволит определить пространственное распределение вносимых кабелем затухания и фазового сдвига.

Комплексную оценку погрешностей восстановления характеристик исследуемой антенны на данном ИВК возможно получить по результатам анализа  $N$  последовательно измеренных двумерных массивов АФР поля и рассчитанных ДН. Приняв в качестве начального первый измеренный массив (и, соответственно, первую рассчитанную ДН) путем последовательного сравнения можно выделить дрейфовую составляющую погрешностей измерения АФР и ее влияние на точность восстановления ДН.

Практическая реализация предложенных алгоритмов измерения и обработки полученных результатов проводилась на экспериментальном образце ИВК с планарным сканированием, функционирующем в лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП БГУ и подробно описанном в [1]. В докладе приводятся конкретные результаты измерения и обработки по всем рассмотренным выше составляющим погрешностей.

#### **Выводы:**

- отличительной особенностью предложенной комплексной оценки погрешностей является использование только экспериментальных результатов, полученных на данном ИВК, что не накладывает никаких предварительных ограничений на величины и законы распределения погрешностей;

- в предложенной оценке максимально учтены все механизмы формирования погрешностей, причем оценка дается в комплексе, а не по отдельным параметрам (например, погрешность позиционирования или отклонения от поверхности измерения);

- предложенная оценка позволяет реально оценить динамический диапазон восстанавливаемых дальнезонных характеристик при заданной величине погрешности;

- предложенная оценка по величине минимальных границ разброса восстановленных ДН может рассматриваться как наиболее объективная оценка пространственно-амплитудных погрешностей восстановления ДН для данной конкретной антенны.

#### **Литература**

Будай. А.Г. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне / А.Г. Будай, А.П. Гринчук, А.В. Громько // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 4. – С. 334–343.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАДИОГЛОГРАФИЧЕСКОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СО СФЕРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ**

**Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.**

*Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета», Минск, Республика Беларусь*

Практически реализуемые радиоголографические измерительно-вычислительные комплексы используют сканирование по плоскости, цилиндру или сферической поверхности [1]. Измерения по плоскости и цилиндру имеют ограничения по типам измеряемых антенн. Способ сканирования по сфере является универсальным, не накладывает никаких ограничений на вид поля и размеры антенной системы и может использоваться для измерения характеристик слабонаправленных антенн, систем антенна-обтекатель, имеющих значительное удлинение и др.

Структурная схема радиоголографического измерительного комплекса со сферическим сканированием приведена на рис. 1.

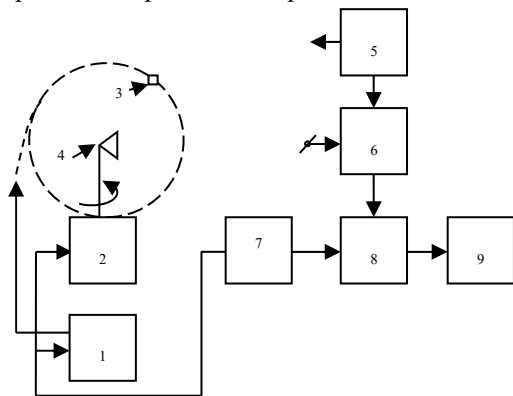


Рисунок 1: 1 – поворотное устройство сканирования по координате  $\theta$ ; 2 – поворотное устройство сканирования по координате  $\varphi$ . 3 – зонд; 4 – исследуемая антенна; 5 – СВЧ-генератор; 6 – измерительный приемник; 7 – контроллер управления сканирующими устройствами; 8 – контроллер ввода данных; 9 – компьютер

Структурно и идеологически представляемый комплекс аналогичен планарным измерительным комплексам [2]. Однако сферическое сканирование имеет свою специфику как в аппаратной, так и в алгоритмической и программной областях. В частности, в отличие от восстановления характеристик по измерениям на планарной и цилиндрической поверхностях, где используются эффективные алгоритмы БПФ, обработка результатов измерения на сферической поверхности требует традиционного интегрирования с привлечением присоединенных функций Лежандра и сферических функций Ханкеля. Решение уравнения Максвелла в сферической системе координат для комплексных амплитуд тангенци-

альных составляющих вектора электрического поля позволяет представить электромагнитное поле  $\vec{E}_r(\theta, \varphi, r)$  на поверхности сферы радиуса  $r$ , охватывающей излучающую систему в виде разложения по векторным сферическим функциям (гармоникам) [3]:

$$\vec{E}_r(\theta, \varphi, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^{+n} A_{mn} \cdot \vec{M}_{mn} + B_{mn} \cdot \vec{N}_{mn}$$

Векторные сферические функции  $\vec{M}_{mn}, \vec{N}_{mn}$  и комплексные коэффициенты  $A_{mn}, B_{mn}$  выражаются через полиномы Лежандра  $P_n^m(\theta)$ , сферические функции Ханкеля  $Z_n(kz)$  и тангенциальные составляющие вектора  $E$  на сферической поверхности радиуса  $r_0$  ( $r_0$  – радиус сферы, на которой производится измерение) [4]. Число  $N$  определяется радиусом минимальной сферы, охватывающей измеряемый объект. Тангенциальные составляющие поля  $E_\varphi, E_\theta$  на сфере любого радиуса (как больше, так и меньше  $r_0$ ) рассчитываются по формулам, содержащим Фурье преобразование по координате  $\varphi$ . В тоже время полиномы Лежандра  $P_n^m(\cos\theta)$  можно представить в виде конечного ряда Фурье:

$$P_n^m(\cos\theta) = \frac{(2n)!}{2^n n! (n-m)!} e^{-j\frac{\pi}{2}m} \sum_{k=0}^n C_k^{mn} e^{j(n-2k)\theta}$$

где  $C_k^{mn}$  – постоянные коэффициенты, являющиеся результатом алгебраических процедур. Таким образом, интегрирование по координате  $\theta$  также сводится к преобразованию Фурье, что позволяет использовать при расчетах тангенциальных составляющих поля на поверхности произвольного радиуса эффективный алгоритм БПФ.

Разработанное на основании представленного алгоритма программное обеспечение позволяет, используя результаты измерений на сферической поверхности радиуса  $r_0$ , рассчитывать поле в векторном виде на сферической поверхности произвольного радиуса  $R$ . При  $R \gg \lambda$  амплитуда рассчитанного поля определяет пространственную диаграмму направленности исследуемого объекта.

В лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП БГУ изготовлен экспериментальный образец радиоголографического стенда со сферическим сканированием. Внешний вид сканирующих устройств приведен на рис. 2. На крепежном

кронштейне азимутального сканирующего устройства закреплён исследуемый объект – антенна под носовым обтекателем, а устройства сканирования по углу места – измерительный зонд – открытый конец волновода. Такая конфигурация сканирующих устройств позволяет существенно упростить конструкцию поворотных устройств, сделать их более универсальными, упростить процедуру совмещения центров вращения с фазовыми центрами исследуемых антенн различной формы и снизить стоимость измерительного комплекса. В комплексе выбрана привычная с точки зрения представления измеренных результатов т. н. экваториальная компоновка расположения зондовой антенны и исследуемого объекта.



Рисунок 2 – Сканирующие устройства установлены в безэховой камере, выполненной из поглощающего материала «ТОРА 25»

Максимально достижимые геометрические параметры:

- радиус сферической поверхности – 120 см.;
- угол поворота в азимутальной плоскости – 0-330 град.;
- угол поворота в угломестной плоскости – 0-180 град.

Выбранные размеры позволяют измерять параметры широкого круга изделий, функционирующих в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Конкретные размеры области сканирования устанавливаются для конкретной измеряемой антенной системы.

В отличие от планарного сканирования, где достаточно просто решается вопрос поляризационного базиса, а также возможен экспресс анализ по измерениям одной строки и одного столбца в центральной области измеряемой апертуры (что,

несомненно, является существенным преимуществом измерений на плоскости), при сферическом сканировании для получения полной информации требуется измерение на двух ортогональных поляризациях, что усложняет конструкцию узла зондовой антенны. В реализованном экспериментальном образце проводится последовательное измерение двух массивов отдельно на каждой поляризации. После обработки процесса измерения и алгоритмов обработки, зондовый узел будет доработан и измерения двух ортогональных поляризаций будет проводиться последовательно при каждом угловом положении зонда, что, естественно, повысит точность измерений.

Контроллер управления обеспечивает как независимое перемещение по каждой угловой координате, так и последовательное сканирование по двум координатам в автоматическом режиме: – поворот исследуемого объекта в азимутальной плоскости в пределах выбранного углового сектора, перемещение зондовой антенны на выбранный угловой дискрет, затем опять поворот в азимутальной плоскости в обратном направлении. Ввод данных в компьютер в виде двумерных массивов и графическое представление результатов измерения и расчетов аналогичны описанным в [2].

#### Литература

1. Будаев А.Г. Разработка концепции построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будаев, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 2. – С. 151–159.
2. Будаев А.Г. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне / А.Г. Будаев, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 4. – С. 334–343.
3. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М. – 1978.
4. Арфкен Г. Математические методы в физике. – М. – 1970.

УДК 006.91

### ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ В РАМКАХ СМК

Гуревич В.Л., Разумный А.И.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

Согласно новой версии СТБ ISO 9001, системы менеджмента измерений – это набор взаимосвязанных или взаимодействующих элементов, необходимых для достижения метрологического подтверждения и управления процессами изме-

рений. Как видно из определения, понятие системы менеджмента измерений достаточно органично сочетается с понятием менеджмента качества и в новой редакции международного стандарта устанавливаются требования, в том числе к

системе менеджмента измерений. Одно из отличий от предыдущих версий стандарта заключается в том, что новая редакция четко устанавливает место системы менеджмента измерений как части системы менеджмента качества организации (лаборатории).

Сформулируем преимущества системы менеджмента измерений. Еще в прошлом веке Э. Деминг выдвинул гипотезу о том, что процесс измерений является процессом, которым по аналогии с технологическим процессом можно управлять. В этом смысле процесс измерений выступает как объект менеджмента качества. В свою очередь инструментом стабильного управления процессами измерений является система менеджмента измерений. Таким образом, наличие в организации (лаборатории) результативно функционирующей системы менеджмента измерений означает, что процесс измерений находится в управляемых условиях.

Это несет в себе определенные выгоды. Во-первых, это внутренние выгоды для организации. Система менеджмента измерений является инструментом руководства для достижения результативности, эффективности и стабильности деятельности (то есть приводит к снижению рисков получения неправильных результатов измерений). Во-вторых, это внешние выгоды. Наличие функционирующей и результативной системы менеджмента измерений обеспечивает повышение уровня доверия к результатам измерений, признание протоколов испытаний и т. д. (то есть ведет к снижению технических барьеров в торговле, что обеспечивает повышение экспортного потенциала страны).

Можно выделить два обобщенных подхода к проектированию и созданию системы менеджмента измерений: системные подходы и эмпирические подходы. Кратко рассмотрим оба этих подхода.

Системные подходы разделить на подходы в отношении качества в целом (классический подход (СТБ ISO 9001, цикл P-D-C-A)) и подходы в отношении отдельных метрологических аспектов (например: управление процессами измерений (СТБ ИСО 10012), ресурсы процесса (оборудование) (серия ТКП 8.XXX), организационная структура лаборатории (СТБ ISO/IEC 17025, СТБ 941.3, СТБ ISO/TS 16949), методы статистического анализа данных (СТБ ИСО 5725) и т. д.).

С другой стороны существует достаточно богатая практика зарубежной метрологической и производственной деятельности. Тут можно выделить метрологический и производственный опыт американских и немецких автомобильных компаний.

Американские метрологи в рамках отраслевого стандарта на СМК QS 9000 разработали руководство «Анализ измерительных систем» (Measurement Systems Analysis – MSA) [1]. Отличитель-

ной особенностью руководства MSA является то, что он рассматривает процесс измерений и его результативность в комплексе (как систему), обращая внимание на особенности и «узкие места», встречающиеся в практике лабораторий, а также приводит рекомендуемые техники и инструменты управления, анализа и принятия решений на различных этапах. В 2006 году QS9000 был отменен, однако MSA прочно вошел в практику зарубежной метрологической деятельности в рамках международного стандарта ISO/TS 16949 и лег в основу вышедшего в 2016 году СТБ 2450.

Немецкие метрологи в рамках своего отраслевого стандарта на СМК разработали руководство «Пригодность измерительных процессов» (Capability of Measurement Processes), которое использует другой метод для оценки процесса измерений, используя в качестве основы статистические понятия, установленные в Руководстве по выражению неопределенности в измерениях (GUM) [2].

При таком подходе недостатком Системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь является то, что у нее нет четкого комплексного представления о представлении и управлении процессом измерений. Она частично определяет состав процесса, рассматривает отдельные элементы процесса измерений во времени, без учета взаимосвязей между ними, иными словами, в целом не дает полной картины для разработки результативной системы менеджмента измерений.

Таким образом, для проектирования и разработки модели результативной системы менеджмента измерений как части системы менеджмента качества организации необходимо использовать как системные, так и эмпирические подходы, реализовав, таким образом, комплексный подход к проектированию и созданию системы менеджмента измерений. Тут важно отметить, что адаптировать оба этих подхода к нашей стране нужно с помощью объединения и взаимного дополнения требований данных подходов на основе принципа непротиворечивости уже функционирующей Системе обеспечения единства измерений Республики Беларусь.

Рассмотрим особенности проектирования системы менеджмента измерений. Результативность процесса измерений обеспечивается, с одной стороны, организационной составляющей, и с другой стороны, технической составляющей.

Организационная составляющая определяется качеством структуры (организации) процесса измерений и требует наличие процессов различных категорий (управленческих (лидерство), обеспечивающих (ресурсы), основных (процессы измерений), процессов измерения, анализа и улучшения, организованных в цикл P-D-C-A), а также структуры, соответствующей сети про-

цессов (взаимосвязи и взаимодействия процессов различных категорий). На этом этапе решается задача разработки пригодной, адекватной, результативной и эффективной системы менеджмента измерений как части системы менеджмента качества деятельности организации (лаборатории), ключевым элементом которой является система измерений как инструмент обеспечения результативности и эффективности процесса измерений.

Для разработки системы менеджмента измерений организация (лаборатория), согласно п. 4.4.1 СТБ ISO 9001, должна «определить процессы, их входы и выходы, взаимодействия между процессами, определить и обеспечить ресурсы, назначить обязанности и предоставить полномочия...», то есть сформировать модель сети процессов (процессный подход). В этом смысле, для формирования модели системы менеджмента измерений как сети взаимосвязанных процессов удобно использовать стандарт описания сети процессов IDEF0. Его преимуществами являются комплексность описания процессов различных категорий (управление, ресурсы, информационные потоки, обратные связи), системность структуризации процессов посредством механизма декомпозиции, возможность детализации информационных потоков, простота построения и наличие строгих требований, обеспечивающих получение моделей стандартного вида. Причем при проектировании и разработке необходимо, во-первых, взять за основу типовую модель, основанную на СТБ ISO 9001, так как система менеджмента измерений должна являться частью системы менеджмента качества и быть гармонизирована с ней, и, во-вторых, учесть эмпирические и системные подходы, о которых говорилось выше на основе принципа непротиворечивости. В этом смысле типовая функциональная модель в соответствии с СТБ ISO 9001 удобна с той точки зрения, что она содержит «незаполненную» структуру основных процессов, обменивающихся ресурсами. Кроме того, такой подход

четко установит место и критерии метрологического аудита (аудита системы менеджмента измерений), который должен являться частью аудита системы менеджмента качества деятельности организации (лаборатории).

Техническая составляющая определяется качеством ресурсов, используемых в организации и проведении процесса измерений (то есть требует наличие элементов процесса измерений). На этом этапе решается задача методического обеспечения жизненного цикла систем измерений – как основного объекта менеджмента в части управления качеством механизмов преобразования. То есть, техническая составляющая обеспечения результативности системы менеджмента измерений – это ресурсное и методическое обеспечение этапов жизненного цикла единичной системы измерений.

В заключении можно отметить, что разработка концепции результативной системы менеджмента измерений как части системы менеджмента качества посредством обеспечения как организационной, так и технической составляющей на основе комплексного подхода является актуальной задачей для метрологического обеспечения промышленных предприятий Республики Беларусь. Решение данной задачи позволит повысить экспортный потенциал промышленных предприятий страны за счет снижения рисков получения неправильных результатов измерений (то есть предотвращения выпуска дефектной продукции) и повышения уровня доверия к результатам измерений (документированная система менеджмента измерений может служить в качестве доказательной базы).

#### Литература

1. Measurement Systems Analysis (MSA). Reference Manual. Fourth Edition, 2010. – 241 с.
2. Verband der Automobilindustrie (VDA) 5. Quality Management in the Automotive Industry. Capability of Measurement Processes, 2011. – 167 с.

УДК 621.391.1(075.8)

### УСТАНОВКА ПОВЕРКИ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ

Есьман Г.А., Шевель К.П.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Обеспечение высоких темпов развития промышленного комплекса Республики Беларусь связано с повышением технического уровня производства, его механизацией и автоматизацией, дальнейшим совершенствованием существующих и внедрением качественно новых, высокоэффективных технологических процессов и оборудования.

Одна из важных частей процесса производства деталей – контрольные операции. Для осуществления контроля используется измерительное оборудование. Для того, чтобы обеспечить точ-

ность и качество измерений, оборудование должно проходить поверку. Поверка измерительных приборов осуществляется с помощью широкого спектра устройств от простейших до сложных измерительных систем.

Одним из самых распространенных эталонов длины является концевая мера. Концевые меры длины бывают рабочие и образцовые. Рабочие меры предназначены для регулировки и настройки показывающих приборов и для непосредственного измерения линейных размеров промышлен-

ных изделий, а образцовые меры для передачи размера единицы длины от первичного эталона концевым мерам меньшей точности и для поверки и градуировки измерительных приборов. Поверка мер проходит согласно государственной поверочной схеме методом сравнения с образцовой мерой длины. Измерения происходят на оборудовании высокой точности.

Это довольно трудоемкий процесс, требует хорошей концентрации внимания и большого количества времени. Облегчение измерений и упрощения расчетов параметров, а также их быстрого вывода для оператора является важной задачей. Т.к. концевые меры используются повсеместно, задача разработки оборудования для поверки, которое соответствовало бы высоким требованиям представляется весьма актуальной. Такими требованиями могут быть: требования точности и надежности, требования к автоматизации процесса поверки и сопутствующих операций, хранение измеренных значений, наглядная методика поверки, требования к простоте конструкции и максимальному удешевлению себестоимости, требования к эргономике.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки для поверки концевых мер длины. Она предназначена для измерения срединной длины и определения отклонения от плоскопараллельности концевых мер длины 3 и 4 разрядов и рабочих мер длины 1–5 классов точности с номинальной длиной от 0.5 до 100 мм и применяется при их поверке. Принцип действия – индуктивный. Метод измерения – сравнение с эталонной мерой.

1. Механизм точного перемещения.
2. Кронштейн.
3. Направляющая скользящая.
4. Каретка.
5. Маховик.
6. Упругий параллелограмм.
7. Индуктивные датчики.
8. Объект измерения-концевая мера длины.
9. Пара винт-гайка.
10. Механизм стопорения.

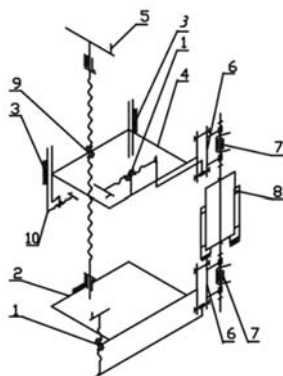


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

Установка представляет собой компьютеризированное рабочее место поверителя, состоящее из лабораторного стола, в столешницу которого встроена плита из гранита. В плиту вмонтирована колонка с двумя кронштейнами – верхним и нижним. В кронштейнах установлены индуктивные преобразователи (ИП). Нижний кронштейн крепится неподвижно на колонке. Верхний кронштейн установлен на каретке 4 и перемещается по колонке с помощью микровинта вращением маховика 5. Измерительные преобразователи 7 расположены соосно. Арретирование обоих преобразователей осуществляется автоматически.

Эталонная и поверяемая мера размещаются в кассетах, и их перемещение производится с помощью манипулятора.

Для определения срединной длины и отклонения от плоскопараллельности применяется следующая методика согласно поверочной схеме МИ 2060-90.

Для определения отклонения от плоскопараллельности, и отклонения от номинальной длины при измерениях методом сравнения длины поверяемых концевых мер с образцовыми при помощи контактных средств поверки проводят измерения и отсчеты в следующей последовательности (Рисунок 2):

- на образцовой концевой мере в средней точке – отсчет  $O_H$  (нуль начальный);
- на поверяемой концевой мере в средней точке – отсчет  $C_1$  и в четырех угловых точках измерительных поверхностей на расстоянии 1-2 мм от прилегающих нерабочих поверхностей (отсчеты  $a, b, d, e$ ) и снова в средней точке – отсчет  $C_2$ ;
- на образцовой концевой мере в средней точке – повторный отсчет  $O_K$  (нуль конечный).

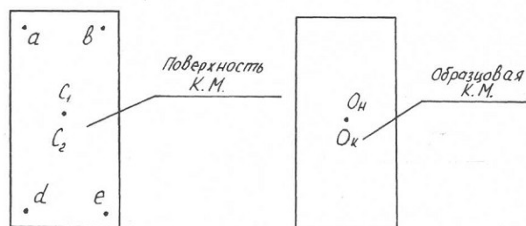


Рисунок 2 – Схема поверки плоскопараллельных концевых мер длины

В качестве измерительных преобразователей для установки выбраны индуктивные измерительные преобразователи.

Конструктивно измерительный стержень датчика подвешен на мембранах аналогично измерительному стержню оптикатора, что обеспечивает высокие метрологические характеристики. Пружина измерительного усилия вынесена в зону измерительного наконечника, а в задней части корпуса встроены мембранный вакуумный арре-

тир, для подключения которого на корпусе преобразователя имеется штуцер.

Преобразователь подходит по параметру допускаемой погрешности, а также он позволяет механизировать процесс измерения благодаря встроенному приводу вакуумного арретирования.

Схема измерения представлена на рисунке 3. Данная схема позволяет исключить ряд погрешностей, связанных с установкой на измерительной позиции и более точно измерять параметры меры.

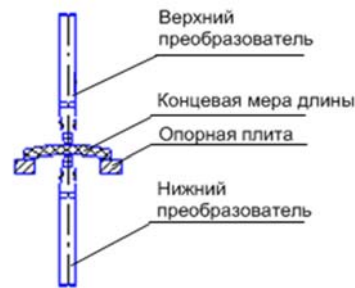


Рисунок 3 – Схема измерения

УДК 621.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕМАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Петрович В.А.<sup>1</sup>, Завацкий С.А.<sup>1</sup>, Волчэк С.А.<sup>1</sup>, Серенков В.Ю.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>"Белмикрoанализ" Филиала НТЦ "Белмикросистемы" ОАО "ИНТЕГРАЛ"-управляющая компания холдинга "ИНТЕГРАЛ", Минск, Республика Беларусь

### Введение

Пусть имеется конденсатор с плоско параллельными, одинаковыми по площади ( $S$ ) обкладками (электродами), изготовленными из металла. Расстояние между обкладками –  $d$ . Для этого простейшего случая расчет величины емкости конденсатора  $C_x$ , заполненного жидкостью с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_x$  осуществляется по формуле:  $C_x = \epsilon_0 \epsilon_x \left(\frac{S}{d}\right)$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная. Для определения  $\epsilon_x$  при этом достаточно экспериментально определить величину  $C_x$ .

Классический вариант определения  $C_x$  – формирование последовательного колебательного контура с использованием этого конденсатора ( $L_0 C_x$ ) и определение на заданной частоте величины  $C_x$ . При этом заданная частота должна быть равной резонансной частоте контура, включающего в себя изучаемый конденсатор  $C_x$ . Значение добротности колебательного контура  $Q$  должно быть максимальным и составлять десятки – тысячи единиц. В том случае, если  $Q$  меньше указанных величин, зарегистрировать состояние резонанса становится либо крайне затруднительным, либо вообще невозможным.

Известные  $Q$ -метры, работая в диапазоне частот от десятков килогерц и выше, для контуров с  $Q$  более 5 позволяют тем самым определять величину  $\epsilon_x$ .

Однако в диапазоне частот от единиц герц до нескольких килогерц классический метод резонансного контура становится неприемлемым. Это связано с тем, что для обеспечения измерений на столь низких частотах создать колебательный контур со значительной величиной  $Q$  нереально. Для этого требуется  $L_0$  высокой добротности и значительное по величине произведение  $fL_0$ . Это противоречит задаче измерения при  $f \rightarrow 0$ . Увеличение  $C_x$  для получения низкой резонансной

частоты ( $f_{рез}$ ) также имеет ограничения: увеличение  $C_x$  – это увеличение площади обкладок  $S$  во-первых, и уменьшение расстояния между ними во-вторых. Эти обстоятельства зачастую имеют решающее значение.

Метод колебательного контура, как уже отмечалось, неприменим и для низкочастотных колебательных контуров, когда добротность колебательного контура определяется добротностью конденсатора  $C_x$ , т.е. свойствами изучаемой жидкости. При этом становятся невозможными измерения и при повышенных частотах.

### Методика определения диэлектрической проницаемости жидкостей по их иммитасным характеристикам

В настоящее время ОАО МНИПИ (г. Минск) выпускает измерители иммитанса серии Е7, и в частности – приборы Е7-25 и Е7-28. Например, прибор Е7-25 работает в диапазоне частот от 25 до  $10^6$  Гц, а прибор Е7-28 от 25 до  $10^7$  Гц.

Диапазон измеряемых добротностей любых двухполосников находится в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^4$ . При этом в основе определения  $Q$  (и обратной величины  $\text{tg} \delta = Q^{-1}$ ) является измерение угла сдвига фаз  $\phi$  в двухполоснике. Далее, в зависимости от того, как программируется последующая работа прибора, на табло выводятся численные значения параметров эквивалентных схем измеряемого двухполосника: параллельной или последовательной –  $C_p$ ,  $R_p$ ,  $L_p$  и  $C_s$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ , соответственно.

В том случае, когда для  $C_x$  (частный случай двухполосника) значение  $Q$  оказывается значительно больше единицы (более 5-10 единиц), значение  $C_p$ ,  $C_s$  и  $C_x$  будут совпадать друг с другом с точностью не хуже 1%. Это дает возможность определять  $\epsilon_x$  с использованием указанной формулы для  $C_x$  и далее не обсуждается. Этот случай, когда изучаемый материал высокочастотный.

При  $Q$  менее 5-10 единиц, т. е. если изучаемый материал низкодобротный, то, например,  $C_p = C_x \frac{1}{1+tg^2\delta}$  и  $C_p \neq C_s \neq C_x$ , т. е. параметры эквивалентных схем измеряемого двухполюсника не несут информации о  $C_x$ . При этом непосредственно использовать регистрируемое прибором значение  $C_p$  и  $C_s$  для определения  $\epsilon_x$  нельзя. В связи с этим, мы предлагаем поступать следующим образом:

1. Создается датчик, представляющий собой колебательный контур, в котором конструктивно совмещены  $L_0$  и  $C_x$  путем изготовления обкладок конденсатора в виде коаксиально расположенных двух металлических спиралей (или одной спирали, внутри которой размещен второй электрод в виде стержня). Спираль – это индуктивность  $L_0$ , конденсатор – это «обкладки в виде спиралей», между которыми расположен либо изучаемый материал, либо материал с известным значением  $\epsilon_x$ , например, воздух с  $\epsilon_B = 1$ .

2. Датчик помещается, например, в сухой воздух. При этом приборы Е7-25 или Е7-28 должны зафиксировать  $tg\delta$  порядка  $10^{-3}$  и менее. Этот критерий исправности датчика и его готовности к последующему использованию. Кроме этого, при регистрации величины  $C_B$  в диапазоне частот 1-10 кГц должно быть зафиксировано и следующее условие:  $C_p = C_s = C_B = \epsilon_0 \left(\frac{S}{d}\right)$ .

3. На участке, где  $C_B$  зависит от частоты, эта зависимость регистрируется и находится резонансная частота  $f_{рез}^B$  по максимальным значениям  $tg\delta$ .

4. Датчик погружается в жидкость с неизвестным значением  $\epsilon_x$  и находится новая резонансная частота  $f_{рез}^x$  по максимальным значениям  $tg\delta$ .

Сдвиг  $f_{рез}^x$  относительно  $f_{рез}^B$  в область более низких частот будет обусловлен величиной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_x$ .

5. По формуле  $\epsilon_x = \left(\frac{f_{рез}^B}{f_{рез}^x}\right)^2$  определяется величина диэлектрической проницаемости изучаемой жидкости.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве объекта исследований была выбрана смесь дистиллированной воды и этилового спирта. Приготовление конкретного раствора (с определенным объемным соотношением вода-спирт) осуществлялось следующим образом: точки 1, 2 и 3 на рисунке 1 получены путем пипетирования в этиловый спирт воды; точки 4, 5 и 6 получены при пипетировании в воду спирта. Измерения проводили при 20°C. В качестве датчика использовали следующую конструкцию: наружный спиралевидный электрод и центральный стержневой электрод, оба выполнены из нержавеющей стали. Численное значение  $tg\delta$  для всех приготовленных растворов (от чистой воды до

чистого спирта) находилось в пределах от 5 до 1 000 единиц. Таким образом, изучаемые растворы представляли собой низкодобротные системы. Определение  $C_B$  осуществлялось на частоте 1 кГц, область резонансных частот для водно-спиртовых смесей находилась в пределе 50-500 кГц.

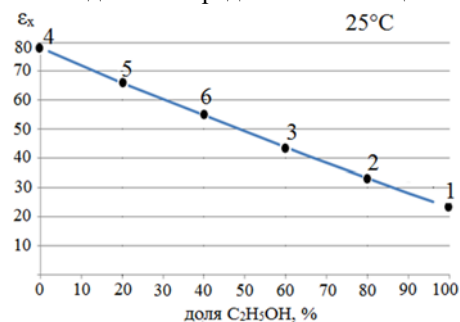


Рисунок 1 – Зависимость диэлектрической проницаемости водно-спиртовой смеси от весовой доли спирта

На рисунке 1 представлена зависимость диэлектрической проницаемости водно-спиртовой смеси от весовой доли спирта, которая имеет линейный характер, что свидетельствует об отсутствии образования молекулярно-структурных комплексов. Кроме этого, по нашему мнению, линейность зависимости указывает на постоянство значений поляризуемости как молекул воды, так и молекул спирта, без взаимного влияния.

Из приведенного рисунка также видно, что крайние точки графика (точки 1 и 4), соответствуют известным численным значениям диэлектрической проницаемости для чистой воды и чистого спирта. Так, по нашим экспериментальным результатам диэлектрическая проницаемость воды составляет 79,5, а спирта – 23.

Для возможного практического использования предложенной методики специфично, что геометрические параметры датчиков не оказывают влияния на регистрируемые результаты по величине  $\epsilon_x$ , что также подтверждается предложенной формулой для определения  $\epsilon_x$ . Вместе с тем, изменяя геометрические параметры датчиков, можно смещать частотный диапазон измерений как в область более низких, так и более высоких значений.

#### Заключение

В данной работе предложена методика определения диэлектрической проницаемости немагнитных жидкостей на измерителях иммитанса серии Е7 с использованием индуктивно-емкостных датчиков, эффективность которой подтверждается приведенными экспериментальными результатами.

При соответствующей доработке конструкции датчиков и методики возможно использование их не только для выборочного (путем взятия проб), но и непрерывного мониторинга состава и качества жидкостей, автоматизации соответствующих технологических процессов, научных исследований.



УДК 006.063

**О НОРМАТИВНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ К ПРОЦЕДУРЕ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ  
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
Купреева Л.В., Солодухо Ю.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Внесение в конце 2016 года изменений и дополнений в законодательство Республики Беларусь о техническом нормировании и стандартизации, а также принятие новой редакции Закона Республики «Об оценке соответствия техническим требованиям и аккредитации органов по оценке соответствия» позволяет в настоящее время производителям строительных металлоконструкций применять соответствующие документы в области технического нормирования и стандартизации, в частности международные и региональные стандарты, для разработки и производства собственной продукции с целью расширения рынков сбыта строительной продукции и ее экспорта в страны ЕС. При этом отечественные производители стальных и алюминиевых конструкций сталкиваются с проблемой осуществления процедуры оценки соответствия данного типа продукции и нанесения на нее маркировки знаком CE из-за неполного понимания требований технического законодательства ЕС, а также отсутствия в Республике Беларусь аккредитованных органов по сертификации, осуществляющих маркировку знаком CE строительных металлоконструкций. Дополнительным сдерживающим фактором для белорусских производителей является также неизбежно возникающие при этом финансовые и материальные затраты.

В связи с этим ранее нами совместно с ООО «Норм Тест», являющегося официальным представителем немецкого Органа по сертификации систем менеджмента и персонала TÜV Thüringene.V. в Республике Беларусь, были проведены исследования и сформулированы предложения, позволяющие методически осуществить подготовку производства строительных металлоконструкций к процедуре оценки соответствия требованиям стандартов серии EN 1090, ISO серии 3834 с учетом требований ISO 9001.

Анализ совокупности элементов, составляющих процедуру оценки соответствия стальных и алюминиевых конструкций, а также технических требований, предъявляемых к собственно металлоконструкциям, сварке и проведению сварочных работ, персоналу, выполняющему сварочные работы, позволил разработать программу, включающую перечень основных мероприятий, позволяющих обеспечить организации нанесение на производимую продукцию маркировки знаком CE.

В соответствии с разработанной программой работ была установлена последовательность выполнения определенных этапов, необходимых

производителю для успешной подготовки производства стальных и алюминиевых металлоконструкций к процедуре оценки соответствия, включая определение технических характеристик продукции, подлежащих декларированию со стороны изготовителя, описание процедуры проведения первоначальных типовых испытаний; организацию проведения заводского контроля над производством, сварочного процесса и других технологических операций, определение требований к материалам и комплектующим металлоконструкциям; разработку документов, регламентирующих и подтверждающих калибровку (поверку) и техническое обслуживание контрольно-измерительных приборов, а также определение других требований и процедур в соответствии с ISO 9001. Необходимо отметить, что наличие у отечественного предприятия-изготовителя строительных металлоконструкций системы менеджмента качества в соответствии с СТБ ISO 9001 версии 2015 года значительно упрощает решение проблемы, связанной с процедурой оценкой соответствия, хотя и не является обязательным условием в соответствии с требованиями стандарта СТБ EN 1090-1.

На основании предложенных рекомендаций в рамках деятельности конкретной организации, изготавливающей стальные конструкции и осуществляющей их монтаж, нами был разработан стандарт организации при реализации перехода от действующей системы менеджмента качества на новую версию государственного стандарта СТБ ISO 9001-2015.

В основу разработки стандарта организации СТП ХХХХХ.ХХ.ХХ – 2018 «Менеджмент систем. Управление производством изготовления и монтажа стальных конструкций» было положено руководство по заводскому контролю над производством данного предприятия.

Основные требования разработанного стандарта организации направлены на установление ответственности лиц, выполняющих различные работы в процессе управления производством изготовления и монтажа стальных конструкций. В частности, были определены и приведены обязанности и полномочия следующих ответственных лиц:

- руководителя производства ремонтных и строительно-монтажных работ;
- директора базового филиала;
- начальника отдела технического контроля;
- начальника отдела главного сварщика;
- директора филиала организации;
- начальника отдела управления качеством.

В ключевом разделе стандарта организации были установлены требования к процессу «Управление производством изготовления и монтажа стальных конструкций», включающие последовательное выполнение следующих основных этапов:

а) закупка материалов (элементов стальных конструкций, включая стали, сварочные материалы и крепежные детали), соответствующих требованиям EN 1090-2;

б) подготовка, изготовление и сборка стальных деталей элементов конструкций:

1) перемещение и хранение составляющих частей;

2) описание процесса механической резки, направленного на соблюдение требований к геометрическим допускам, твердости поверхностей и шероховатости поверхности кромок;

3) описание процесса образования отверстий в элементах стальных конструкций;

4) организация, обеспечение и производство сварочных работ при изготовлении стальных конструкций, включая требования к персоналу (сварщикам и специалистам) в соответствии с требованиями ISO 9606-1 и ISO 14731;

5) описание процесса монтажа элементов стальных конструкций;

б) описание процесса обработки поверхностей с целью защиты от коррозии;

в) осуществление процедуры оценки соответствия и проведение первоначальных типовых испытаний элемента конструкции или комплекта элементов стальной конструкции требованиям стандарта EN 1090-1 и установленным характеристикам. Проведение первоначальных типовых испытаний предусмотрено как на начальном этапе изготовления нового элемента конструкции или при применении новых составляющих частей, так и на начальном этапе внедрения новых или видоизмененных методов производства, если они могут повлиять на характеристики, подлежащие оценке, а также при изменении технологии производства с целью повышения класса производства конструкции. Информация, полученная при проведении первоначального типового испытания, заносится в бланк, установленной формы;

г) описание контроля качества готовой продукции;

д) оформление декларации соответствия по установленной форме. Информация в декларации должна соответствовать требованиям стан-

дарта EN 1090-1. В частности, к обязательным элементам заполнения декларации относятся: наименование и адрес производителя; описание элементов конструкций и копия сведений; сопровождающих СЕ-маркировку; требования, которым соответствует изделие; особые условия использования изделия; номер прилагаемого сертификата на производственный контроль; информацию о лице, имеющем право подписи декларации от лица производителя;

е) описание процесса нанесения маркировки знаком СЕ и оформления бланка установленной формы.

Информация о маркировке знаком СЕ должна содержать:

– идентификационный номер органа по сертификации системы заводского производственного контроля;

– наименование или фирменный знак и юридический адрес изготовителя;

– последние две цифры года нанесения маркировки;

– номер сертификата на систему заводского производственного контроля;

– ссылку на стандарт EN 1090-1;

– описание элементов конструкций; общее наименование, материалы, геометрические параметры и предназначение;

– информацию о существенных характеристиках элемента конструкции в соответствии с EN 1090-1;

– указание «Характеристика не установлена» (при необходимости);

– класс возведения элемента конструкции согласно EN 1090-2;

– ссылку на технические условия на элемент конструкции.

Кроме того, стандартом организации предусмотрен порядок документирования подлинников и рабочих экземпляров документов, связанных с процессом управления производством изготовления и монтажа стальных конструкций, включая сведения о местах и сроках их хранения.

Разработанный стандарт организации и дополняющий рекомендации, изложенные в программе работ по подготовке производства строительных металлоконструкций, позволит белорусскому производителю данной продукции организовать собственное производство в соответствии с техническим законодательством ЕС и успешно осуществить процедуру подтверждения соответствия при ее экспорте.

## ГИБКАЯ МЕТОДОЛОГИЯ «SCRUM». ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

Ленкевич О.А., Михейчик А.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В последние годы внедрение agile-методологий в разработку ПО стало целой индустрией: по этой теме выпускается специальная литература, собираются тематические конференции, устраиваются тренинги. На рынке труда возникли совершенно новые профессии, такие как agile-коуч или Scrum-мастер. Появились организации, которые специализируются на внедрении гибких методологий в других компаниях [1].

В таких условиях кажется, совершенно логичным заказать внешний консалтинг и «призвать» в свою организацию профессионального Scrum-мастера на несколько месяцев. И это идеальный случай, просто мечта. В реальной жизни чаще по-другому: команда разработки давно устала от хаотично поступающих со стороны менеджмента задач, а менеджмент страдает от непрозрачности разработки, постоянных срывов сроков и низкого качества продукта. При этом высшее руководство не хочет выделять дополнительные средства на услуги профессиональных Scrum-мастеров [2].

В таких условиях у разработчика есть два пути: продолжать терпеть или брать инициативу в свои руки.

Многие технические специалисты в компаниях выбирают второй вариант и внедряют Scrum.

В управление проектами важным является адаптация и ориентация на потребителя. Постоянное внимание к техническому совершенству и качеству проектирования повышает гибкость проекта. Следует учитывать, что люди и взаимодействие важнее процессов и инструментов. Работающий продукт важнее исчерпывающей документации. Сотрудничество с заказчиком не менее важно, чем согласования условий контракта. Готовность к изменениям важнее следования первоначальному плану. Так же важна корректировка требований в любой момент времени, ведь возможность изменения для многих заказчиков привлекательна.

Из-за отсутствия слаженности нарушаются планы, происходит отставание от графика, поставленные задачи дублируются, мнения между персоналом абсолютно расходятся, но при этом считается, что их усилия направлены на достижение одной цели. Бюджет проекта увеличивается, появляется нехватка времени и денег. Кроме того, заказчики зачастую остаются неудовлетворительным окончательным вариантом проделанной работы.

Организация попадает в крайне сложную ситуацию: постоянные переработки, авралы, серьезные проблемы с качеством, проваленные сроки и куча других неприятностей. Поэтому методология Scrum признала решить все эти

проблемы. Scrum – это противоположность классическому поэтапному подходу, применяемому к реализации проектов, он подразумевает постоянный процесс развития. Эту методологию, а именно подход, лежащий в этой методологии, можно применять в разных видах деятельности, в которой требуется коллективная работа. При этом он ориентируется не столько на процесс управления, сколько на сам процесс разработки. Таким образом, Scrum-управление может как дополнить собой любой другой управленческий процесс, так и выступать в качестве самостоятельного.

Важной характеристикой является полная ориентация на потребителя, а именно метод помогает понять потребности заказчика, и сделать ему нужный продукт. Так же следует отметить, что этот метод не требует дорогостоящих инструментов. Основной ее особенностью является вовлеченность в процесс всех участников, причем у каждого участника есть своя определенная роль.

Основой Scrum-методологии является итеративная разработка, а сама она определяет несколько характеристик при работе с проектами:

- Правила планирования и управления списком требований к разрабатываемому продукту;
- Правила планирования итераций;
- Правила взаимодействия между членами проектной команды;
- Правила анализа и корректировки процесса разработки.

Работа над проектами выполняется спринтами, «забегами» в период от 1 до 4 недель. Спринтом в Scrum-проекте называется одна итерация (фаза) проекта. В большинстве случаев спринт длится 30 дней. В результате каждого спринта команда должна получить рабочую версию продукта, которую уже можно демонстрировать заказчику. Чем короче спринт, тем проще вносить изменения. По итогу спринта – продукт/услуга, который можно показать заказчику.

Совещание происходит до и после спринта. До спринта ставятся задачи, которые нужно решить. После спринта обсуждается выполнения поставленных задач, чтобы понять, как работать лучше в следующем спринте. Для продуктивной работы проводятся совещания, длившиеся не менее 15 минут.

Что касается команды Scrum, оптимальное количество – 5-7 человек. Для быстрой и эффективной работы не требуется большое количество сотрудников в команде, при большом количестве возникают проблемы с коммуникацией.

Важным является их коммуникабельность и сплоченность. При отсутствии этих качеств, метод Scrum работать не будет ни в одной области деятельности, где есть командная работа.

Scrum полагается на самоорганизующуюся и кросс-функциональную команду. В ней не должно быть общего лидера, который решает, какой человек будет решать определенную задачу или проблему. Эту проблему или задачу решают командой в целом. Это важная особенность каждого предприятия для успешного роста. Команда должна систематически анализировать возможные способы улучшения эффективности и соответственно корректировать стиль своей работы [3].

Обязательными членами команды являются Scrum – мастер, который непосредственно работает с командой, и владелец продукта, который работает напрямую с заказчиком [3].

Достоинство Scrum'a и одновременно его самый большой недостаток в том, что его необходимо адаптировать к конкретной ситуации. Этот метод не терпит многозадачности и на это стоит обратить внимание, потому что задача этого метода заключается в быстрой и четкой работе. Главным богатством является время, поэтому переключаться с проекта на проект нецелесообразно.

Внедрение Scrum'a разработчиком – это тяжелая и неблагодарная инициатива. Чтобы на такое решиться, должны быть действительно веские причины [4].

Существует несколько формальных признаков, свидетельствующие о том, что внедрения Scrum необходимо в процесс разработки [4], [5]:

- разработчику постоянно приходится переключаться с задачи на задачу;
- задачи разработчику поступают неравномерно;
- разработчики получают разделенные задачи, которые не дают общее представление о продукте;
- при соединении задач воедино от разных разработчиков, получается продукт, работа которого не оправдывает ожидания;

– тестирование продукта оторвано от разработки, что порождает долгий цикл стабилизации продукта;

– нарушение срока выполнения работ.

Важными особенностями, о которых следует знать, являются [4], [5]:

– возникающие сбои в работе Scrum зачастую просто являются результатом неверного применения функционала программы;

– Scrum должен применяться для управления проектами, требования к которым не вступают в противоречия с идеологией данной программы;

– методология Scrum ориентирована на потребности клиента, и ее можно адаптировать к различным типам работы;

– важной особенностью и преимуществом является возможность выдавать потенциально рабочий и функциональный продукт по завершении каждого Sprint;

– продуктивная работа в Scrum должна проводиться профессиональной и много-функциональной командой проекта, создание которой сопряжено с немалыми затратами на отбор и обучение персонала.

Подводя итог, хотелось бы отметить, что технология Scrum прекрасно подходит для управления различными типами проектов, но только при наличии квалифицированных сотрудников, которые смогут в полной мере использовать преимущества данной программы и максимально нивелировать недостатки.

#### Литература

1. Хенрик Книберг. Scrum и XP: заметки в передовой, 2006.
2. Джефф Сазерленд. «Scrum». Революционный метод управления проектами, 2015.
3. <https://habr.com/post/347404/>.
4. <https://agilemanifesto.org>.
5. <https://zhazhda.biz/base/metodologiya-scrum-v-upravlenii-proektami>.

УДК 005

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТИ И ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА

Ленкевич О.А., Чурак Н.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Стандарты, описывающие системы менеджмента организации предъявляют особые требования к компетентности и осведомленности персонала. Согласно СТБ ISO 9000, система менеджмента качества является наиболее результативной, когда все сотрудники понимают и применяют навыки, подготовку, образование и опыт, необходимые для выполнения своих ролей и обязанностей. Обязанностью высшего руководства является предоставление возможностей для персонала развивать необходимые компетенции [1]. Высшее

руководство обязано привлекать к менеджменту качества персонал и поддерживать его, обеспечивать соответствующую компетентность. Особое внимание необходимо уделять к установлению и обеспечению требуемой профессиональной компетентности внутренних аудиторов систем менеджмента. Зачастую аудиторы проявляют не компетентность при проведении внутренних аудитов, что приводит к ошибочным заключениям в отношении систем менеджмента. Высшее руководство принимает не результативные решения,

приводящее к новым рискам и упущенным возможностям. В настоящее время практикуется большое количество способов обеспечения, оценки компетентности и осведомленности персонала, в том числе аудиторов, во всех сферах деятельности. Например, мотивация работников; обмен информацией и знаниями между структурными подразделениями и процессами; дополнительное обучение; наделение полномочиями; проведение самооценки для установления уровня компетентности.

Разные организации «представляют» требования к компетентности и уровню осведомленности персонала по разному и единого «рецепта» установления этих требований не существует. Они могут относиться, например, к уровню обслуживания заказчиков, и устанавливаться в контракте; к определению критериев показателей деятельности; к обеспечению осведомленности об установленных требованиях и критериях принятия решения; к знаниям основных, вспомогательных процессов и методов управления, применяемых в организации.

После определения требований к уровню компетентности через установленные периоды времени должна проводиться оценка компетентности и осведомленности персонала.

Сегодня хорошо известны следующие методы оценки компетентности персонала:

1. Интервьюирование.
2. Метод экспертных оценок.
3. Внешняя оценка.
4. Деловые игры.
5. Самооценка и др.

Возникает вопрос о том, какие методы являются более предпочтительными, как правильно определиться с выбором. При этом для того, чтобы воспользоваться методами обеспечения и оценки компетентности и осведомленности персонала необходимо установить критерии оценки, разработать балльную систему оценки. Порой это занимает много времени и требует определенных знаний и навыков.

Процесс обеспечения компетентности и осведомленности более результативен, если он включает теоретическую и практическую части. Теоретическая часть включает в себя изучение соответствующих стандартов по системам менеджмента, практическая часть – решение ситуационных задач, стандартизационных тестов, участие в ролевых играх. Зачастую такой подход не несет в себе творческой направленности и проявления реального интереса ни у обучаемых, ни у обучающих.

Для развития творческого подхода, повышения заинтересованности сотрудников в понимании и адаптации требований стандартов систем менеджмента к конкретным условиям и обеспечения компетентности персонала организации и внутренних аудиторов, предлагается использовать настольную игру. Игра содержит теоретическую и

практическую части и охватывает знания наиболее часто сертифицируемых интегрированных систем менеджмента – СТБ ISO 9001, СТБ ISO 14001, СТБ 18001, ISO 22000 и др.

Игра содержит игровое поле, на котором по порядку нарисованы игровые ячейки (ходы). В основном в игровых ячейках представлены пункты стандартов систем менеджмента – это теоретическая часть игры. Перед началом игры можно выбрать и заполнять только те игровые ячейки, которые содержат конкретный стандарт системы менеджмента, например проверка знаний системы менеджмента качества на соответствие требованиям СТБ ISO 9001. Игровое поле также включает ячейки, при попадании на которые обучаемый вытягивает дополнительную игровую карту и отвечает на предложенный вопрос – это практическая часть игры. Для того чтобы сделать ход игрок бросает игровые кости и ходит своей фишкой на соответствующую игровую ячейку.

На рисунке схематично изображено игровое поле.

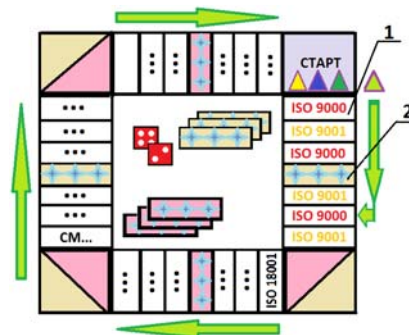


Рисунок 1.

Теоретическая часть игры заключается в том, что игрок должен рассказать соответствующий пункт стандарта системы менеджмента, который ему выпал. Заработанные баллы за ответ начисляются в соответствии с правильностью и полнотой ответа обучаемого.

Практическая часть игры заключается в том, что игрок должен объяснить требование соответствующего пункта стандарта системы менеджмента, который ему выпал, при этом привести пример из своей практики использования в организации, конкретной реализации требования этого пункта стандарта или наоборот рассказать какой(ие) пункт(ы) стандарта выполнен(ы) либо не выполнен(ы) относительно практической ситуации, которая выпала игроку. Заработанные баллы за ответ начисляются в соответствии с правильностью и полнотой ответа обучаемого.

В случае, если игрок не может ответить на вопрос, он может воспользоваться соответствующим стандартом системы менеджмента, при этом на игрока будут накладываться штрафные баллы, с нарастающим количеством которых он рискует досрочно покинуть игру.

Победителем игры становится тот, кто заработал максимальное количество баллов.

В игре может участвовать неограниченное число участников. Для удобства обучения лучше формировать группу из 5-7 человек. Для адекватного и правильного оценивания ответов игроков назначается беспристрастный судья, который обосновывает выставленные баллы, анализирует ошибки и неточности при ответах. Как правило, судьей должен быть назначен человек компетентность в области систем менеджмента значительно выше других игроков, который, например, является экспертом одной из систем менеджмента.

При желании игру можно сделать не только настольной, но и разработать соответствующее несложное программное обеспечение с целью обновления и корректировки игрового поля и карточек с учетом новых требований к системам менеджмента.

На предприятии могут адаптировать игру под имеющуюся сертифицированную интегрированную систему менеджмента, включать вопросы касающихся конкретных целей организации в области качества, процессов, методов контроля, как конкретная деятельность обучаемого персонала влияет на результативность системы.

Руководитель организации может мотивировать победителей игры, например, дополнительным премированием, продвижением по службе, грамотой и т. п. В университете преподаватели могут мотивировать студентов, ставших победителями игры, повышением оценки на экзамене.

По сравнению с известными методами обеспечения и оценки компетентности и осведомленности персонала, игра более эффективна, так как кроме приобретения знаний соответствующих стандартов систем менеджмента и различного типа задач, ее предназначение – играть, а это интереснее, чем просто изучать «скучный» стандарт и решать надоевшие задачи. При этом игра служит отличной мотивацией, для того, кто хочет выиграть, появляется дух соперничества между обучаемыми, осуществляется работа в команде, демонстрируется пример для подражания в знаниях, к которому надо стремиться.

Игра поможет повысить результативность обучения, установить соответствующую компетентность и осведомленность персонала, студентов.

#### Литература

1. СТБ ISO 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь».

УДК 004.896

## METHODS FOR DESIGNING BIOLOGICALLY INSPIRED ROBOTS

V. Lysenko<sup>1</sup>, K. Zimmermann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belorussian national technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Department of mechanical engineering, TU-Ilmenau, Germany

A new approach and development of special problem-solving methods and procedures at the initial design stages of optimized technical systems is presented. The first subject of work is the development of new functional principles for robots and similar technical systems with the use of a tree-like classifications and a transparent morphological Cube. The second method is based on the principles of special transformation techniques, transforming images of a biological object into a technical device by means of graphical modelling in the form of computer animation. The third introduced method is based on the combination of biological and technical objects. The developed method is based on the well-known principle known as the combination of alternative systems.

All methods enable the transfer of characteristics and structure from biological object (i.e. its kinematics) to technical object leading to new desirable characteristics or optimizations of existing technical objects.

In recent years the research focus has been shifting more and more towards legless, or apeal,

locomotion systems that are modelled after snakes or worms, among others. [1]

In the literature several methods of techniques finding technical solutions, sets of software products supporting the process of technical systems design and a selection of technologies to be implemented are described. Nevertheless, having well developed tools of the analysis, these methods frequently have no effective solving tools for problems.

The essential design stage, which is discovering ideas for new functional principles of technical systems, is based almost entirely on the know-how of the engineer and does seldom evolve by means of the computer.

The subject of our work is the development of new functional principles for robots with the use of the biological objects as prototypes. In our paper the description of the synthesis process of new robots and their development is presented. [2], [4]

The developed method is based on the morphological box of Zwicky. The multivariate interactive matrix for OLAP technology is used for the design and development of robots and similar technical systems.

The functions of robots can be realized in several essentially different ways. Developer awareness of all existing possible variants is limited. A morphological method is used for the selection of the kinematics, the principles of action, and the prototype. An interactive computer image is applied for selecting properties of the robot and for subsequent analysis. By means of this interactive visualization, a developer receives hundreds of new variants of robots and their biological prototypes for checking their technical feasibility and calculations. For the synthesis of new robots, a user can choose useful functions. After choosing them he receives some constructive variants of the robot with various combinations of parameters.

The multivariate interactive matrix is used for the design and the development of mobile robots and similar objects. The choice of coordinate axes of a morphological Cube is the most important and comprehensive part of the work. Our program allows speeding up this procedure.

For the synthesis of a new cube, it is possible to choose the tree-like classification in special triangular tables. After choosing them he receives some new morphological boxes with various combinations of parameters.

These classifications are inserted into special triangular tables located in a three-dimensional space and each of them has only one degree of freedom. By moving these tables along each of axes of 3D Cube, an engineer-developer generates a new morphological Cube.

The Morphing method is based on continuous transformation from the biological prototype into a technical system. In the intermediate transformation stages the object being transformed contains both, the characteristics and kinematics of the technical system and of the original nature-based prototype. [3]

The developed method enables the transfer of characteristics and the structure from one object (i.e. its kinematics) to another leading to new desirable characteristics or optimizations of existing technical objects. Thus, computer animation is implemented with the use of graphical modelling and the ability to develop new functional principles of technical systems (i. e. new motion principles, new kinematics etc.) is provided.

A Morphing tool is used to realize the graphical transition from known to new forms of motion. Morphing means the process of transformation of one object into another object. Therefore, a special software for computer animations is used.

Often, engineers may directly use these intermediate results to initiate new technical solutions. In the intermediate transformation stages the object being transformed contains both, the characteristics and kinematics of the technical system and of the original nature-based prototype.

For one technical system the process can be repeated several times by changing the prototypes only, the process of transformation only, or both

simultaneously. Furthermore, it is possible to reprocess the structure gained in one of the intermediate stages as new prototypes or as a new technical system for the subsequent Morphing. Objects can also be recorded by VCR, inserted into the computer program and morphed thereafter. [2]

In our opinion, there exist only 4-5 main principles of functioning of biologic objects for providing the necessary trajectory of the legs or body movement. In known robots the several actuators for moving each leg are used. Our robots principle difference allows to use each actuator for moving several legs. Thus, we managed to minimize number of actuators at the robot. [5]

Minimization of number of actuators multi-legged robots can be reached through:

- use of periodical changing the shape of the body of the robot in horizontal dimension (salamander, lizard);
- use of periodical changing the size of the body of the robot in vertical dimension (flying insects);
- use of anisotropy of friction (snake, worm);
- use of periodical character or feature of trawling wave (holothouria, worm);
- use of multidimensional resonance swinging of elastic extremities (mosquito);
- reducing of number of bearing legs (kangaroo, basilisk, birds).

For micro robots it is possible to use a principle of movement as at Polichetae. In this biologic object the legs have no actuators and no degrees of freedom relative to a body. To create necessary trajectory of a distal end of a leg, Polichetae and Holothouria uses deformation of the case as trawling wave. The number of legs-needles is not limited, but number of the actuators enabling deformation of the case, is minimal. It is possible to create tiny robot with a plenty of legs and with low number of small-sized actuators. The salamander bends its body in a horizontal plane and due to this, moves the body relative to the points of support. By using deformation of a robot body in a horizontal plane it is possible to provide it's moving due to a minimum number of actuators. The actuators are not connected to legs and they are necessary only for deformation of a robot body.

Some flying insects create resonant oscillations of the wings due to periodic change of the form and the sizes of the rigid body. These insects' muscles are connected not to the wings, but to the walls of a rigid body and deform it. Deformation of body turns into swinging of wings. It is possible to create the moving robot at which the case vibrate, and legs have no actuators. The necessary trajectory of distal part of a leg is formed due to excitation of the high-frequency swinging in proximal part of an elastic curvilinear leg and due to mechanical transformation of these swinging in low-frequency.

Applying the techniques described allows us to create several new devices, including a self-

propelling catheter for minimally invasive surgery and other devices for medical applications.

For movement of multi-legged robot through a pipe we use the trawling wave of the *Holothuria* for «*Holothurobot*». Merging the kinematics of a salamander with the kinematics of an octopod allows us to develop «*Eightleggedrobot*» – a new eight legged robot with only three actuators. Combining a flying insect and a piezotransducer with extremities supplies a new object – the piezomicrorobot «*Minchrobot*». Merging the bristle-body with the cross vibrations of unbalanced motor allows us to develop a new *Vibrobristleworm*.

Using our interactive software for the improvement of «man-computer» dialogue is proposed to visualize a selection process of properties and parameters of the robots on a computer screen. The analyses of biological objects and alternative technical systems allow us to create several new biologically inspired robots.

We used the tree-like classifications for automatic construction of various transparent morphological Cubes (boxes) on the screen of a computer. The analyses of biological objects and graphical modelling of technical objects by means of computer animation (*Morphing* – method) offers new opportunities for the engineers. *Morphing* may support the engineer designing technical system implementing biological model. The described technique does not supply convertible constructive

drawings immediately, however, it provides new solutions with new ideas. Furthermore, it is possible to develop essential new robots.

#### References

1. Zimmermann, K.: An approach to the modelling of biological and technical movement systems. 1. International Conference on Motion Systems, Univ. Jena, 1997.
2. Lysenko V., Zimmermann K. Ahranovitch A. Procedure for designing the new technical systems with use of the morphologic inventive Cube. 50. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium. 2005. TU Ilmenau.
3. Lysenko, V.; Zimmermann, K.: New procedure for designing optimized technical systems with use of biological objects. 1st Intern. Conf. on Design & Nature, Udine, Sept. 2002, WIT Press Southampton.
4. V. Lysenko / K. Zimmermann / A. Ahranovich. Method for designing new technical systems based on a Transparent Morphological Cube with the use of the tree-like classifications. 53. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium. 2008. TU Ilmenau.
5. V. Lysenko / W. Minchenya / K. Zimmermann., Minimization of the number of actuators in legged robots using biological objects. 52. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium. 2007. TU Ilmenau.

УДК 531.74.089.68(045)(476)

#### МОДЕРНИЗАЦИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОСКОГО УГЛА-ГРАДУСА

Жагора Н.А., Макаревич В.Б., Горошкова А.Н., Алятина Н.Н., Таланова Т.И., Дорогонько А.Г.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

В Международной системе единиц СИ единицей плоского угла является радиан. Радиан выражен через метр – основную единицу СИ как отношение длины дуги сегмента окружности к радиусу окружности. Для нахождения угла косвенным путем через измерение длины используются, например, такие средства измерений как синусная линейка и угловой интерферометр.

Поскольку такой подход обеспечивает связь единицы плоского угла с основными единицами СИ, существует и альтернативный подход к определению углов, который основан на делении окружности. Деления окружности образуют замкнутый цикл и в сумме равны  $2\pi$  радиан. Таким образом, окружность является естественным эталоном плоского угла.

В настоящее время в БелГИМ имеется Национальный эталон единицы плоского угла-градуса НЭ РБ 6-01. Создан в период (1999-2000 гг.) и утвержден в качестве национального постановлением Госстандарта от № 38 от 24.09.2001 г.

Эталон востребован. Основой эталона до мо-

дернизации являлся автоматизированный лазерный гониометр ГС-1Л (данные приборы серийно выпускались на заводе Арсенал, Украина в 80-е годы прошлого столетия).

Для обеспечения национальной безопасности, интеллектуальной независимости, выпуска качественной и конкурентоспособной продукции, бесперебойного оказания метрологических услуг потребителям, не дожидаясь полного отказа имеющегося эталона. Поэтому в период с 2016 по 2018 г. создан новый Национальный эталон единицы плоского угла-градуса.

Эталоны единицы плоского угла-градуса имеются во многих национальных метрологических институтах, что подтверждается официальными данными, опубликованными на Web-сайте Международного бюро мер и весов (BIPM) в Приложении С.

Наилучшими измерительными возможностями в области измерений плоских углов обладают такие страны как Германия (PTB), Россия (VNIIM) и Великобритания (NPL). В основе со-



здания эталонов плоского угла в НМИ этих стран лежит классическая схема воспроизведения плоского угла, реализуемая с помощью высокоточных автоколлиматоров и прецизионных поворотных столов, которая и была взята за основу модернизации эталона.

#### Состав эталона

Эталон представляет комплекс следующих средств измерений и оборудования:

- автоколлиматоры цифровые ELCOMAT HR производства фирмы “Möller-Wedel GmbH” (Германия) № 283, № 284;
- стол прецизионный поворотный Rotary Table RT-300 производства фирмы «Kunz precision AG» (Швейцария) № RT-300-14-102;
- призмы многогранные эталонные № 01 (24грани), № 118 (24грани), № 018 (8 граней);
- стол специальный из гранита размером 1800 × 1200 мм на опорах активной изоляции от вибраций с компрессором;
- стол сменный предметный (с регулировочными винтами);
- плиты твердокаменные регулируемые под автоколлиматоры;
- компрессор безмасляный спиральный Atlas Copco с ресивером;
- программное обеспечение (далее ПО) «INCOLINK» - ПО цифровых автоколлиматоров;
- ПО «SPiiPlus MMI Application Studio 2.20» – ПО прецизионного поворотного стола;
- ПО эталона (программы FlatAngel и FAMProtocols);
- ПЭВМ с периферийными устройствами;
- комплект документации.

#### Описание эталона

Общий вид эталона представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид эталона

- 1 – цифровые автоколлиматоры ELCOMAT HR,
- 2 – электронные блоки управления автоколлиматорами, 3 – многогранная призма 0 класса точности, 4 – сменный предметный стол с регулировочными винтами для установки угловых мер и многогранных призм, 5 – прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300, 6 – контроллер и вакуумный блок кондиционирования воздуха, 7 – ПЭВМ с периферийными устройствами, 8 – стол специальный из гранита, 9 – опоры активной изоляции от вибраций, 10 – регулируемая твердокаменная плита

Национальный эталон единицы плоского угла – градуса состоит из двух цифровых автоколлиматоров ELCOMAT HR (1) № 283, № 284 с электронными блоками управления (2), расположенных на регулируемых твердокаменных плитах (10), прецизионного поворотного стола Rotary Table RT-300 (5), на который устанавливается сменный предметный стол с регулировочными винтами (4) и призмы 0 класса точности (3).

Оборудование размещается на специальном столе из гранита (8), расположенном на опорах активной изоляции от вибраций (9).

Для обеспечения стабильной и правильной работы радиальных и осевых воздушных подшипников прецизионного поворотного стола Rotary Table RT-300 (5) в вакуумный блок кондиционирования воздуха (6) подается сжатый воздух под давлением 5,5 бар от безмасляного спирального компрессора Atlas Copco с ресивером.

На рисунке 2 представлены: эталонная 24-гранная призма (1), сменный предметный стол с регулировочными винтами (2), прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300 (3).

На рисунке 3 представлены цифровые автоколлиматоры с электронными блоками управления.



Рисунок 2

- 1 – эталонная многогранная призма в оправе (24 грани), 2 – сменный предметный стол (с регулировочными винтами), 3 – прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300

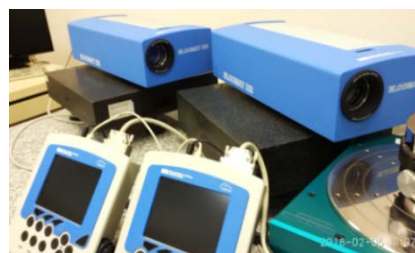


Рисунок 3 – Цифровые автоколлиматоры с электронными блоками управления

#### Принцип действия эталона

Принцип действия эталона основан на делении полной окружности на заданные углы замкнутым циклом. Окружность является естественным эталоном плоского угла-градуса. В этой связи сумма всех углов окружности равна 2π радиан или 360°, а сумма всех отклонений углов окружности равна 0.

Измерение углов между полированными гранями призматических мер плоского угла (далее – мер) осуществляется в двух режимах измерения: с помощью одного автоколлиматора ELCOMAT HR (измерение мер типов 1, 2, 3 и 4) и с помощью двух автоколлиматоров ELCOMAT HR (измерение мер типа 4).

Сменный предметный стол устанавливается и базируется на прецизионном поворотном столе Rotary Table RT-300.

Измеряемая мера устанавливается на сменный предметный стол в поле зрения автоколлиматоров таким образом, чтобы нормаль к отражающей поверхности меры была совмещена с осью выходного излучения одного из автоколлиматоров. Операции по установке измеряемых мер на сменном предметном столе для всех режимов измерения одинаковы.

Измерение углов меры с помощью одного автоколлиматора ELCOMAT HR и прецизионного поворотного стола Rotary Table RT-300 осуществляется в автоматическом режиме по программам

FlatAngel и FAMProtocols. После установки базовых настроек, прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300 поворачивается на заданные углы по и против часовой стрелки  $N$  раз, где  $N$  – количество приемов измерения, результаты измерений заносятся в протокол автоматически.

Для измерения углов меры с помощью двух автоколлиматоров ELCOMAT HR измеряемую меру устанавливают на сменный предметный стол, первый автоколлиматор направляют на грань  $m$ , а второй – на  $n$ . После установки базовых настроек в программе FlatAngel, прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300 поворачивается на заданные углы по или против часовой стрелки (в зависимости от выбора направления измерения)  $N$  раз, где  $N$  – количество приемов измерения, результаты измерений заносятся в протокол автоматически.

Для обработки результатов измерений используют ПО эталона (программы FlatAngel и FAMProtocols).

УДК 311.2

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ИНФОРМАТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Галаган Р.М., Момот А.С.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Тепловой неразрушающий контроль (НК) получил широкое распространение во многих областях промышленности, в основном благодаря своей бесконтактности и скорости проведения. Однако однозначная интерпретация результатов активного теплового контроля зачастую бывает затруднена из-за высокого уровня шумов и помех. Тепловые отпечатки дефектов не всегда несут достоверную информацию об их размерах, форме и точном местоположении. Кроме того, анализируя лишь один информативный параметр – температуру – невозможно определить такие параметры дефектов, как глубина залегания или толщина (раскрытие). Известно также, что гистограммы распределения температур в дефектных и бездефектных участках частично перекрывают друг друга, что снижает надёжность принятия решения [1]. В связи с этим, актуальной задачей является введение дополнительных информативных параметров с целью повышения достоверности контроля.

В активном тепловом контроле одним из важных дополнительных информативных параметров является оптимальное время обнаружения  $\tau_{opt}$ . Это момент времени, при котором дифференциальный температурный сигнал между дефектными и бездефектными областями становится максимальным. Для определения  $\tau_{opt}$  и максимального

значения температурного сигнала  $\Delta T_{max}$  удобно использовать тепловые профили – графики изменения дифференциального температурного сигнала во времени в определённых точках объекта контроля. Известен метод динамической тепловой томографии (ДТТ), основанный на зависимости значения  $\tau_{opt}$  от глубины залегания дефектов [2]. Величина  $\Delta T_{max}$  существенно зависит от размеров дефектов. Однако для подповерхностных дефектов эти зависимости не наблюдаются.

В общем случае, дефектная и бездефектная области могут иметь схожие распределения температур, что усложняет интерпретацию результатов контроля. В то же время, данные области могут перекрываться по одному параметру, но существенно различаться по другому параметру. Например, увеличение глубины залегания дефектов  $l$  приводит к увеличению оптимального времени контроля  $\tau_{opt}$ , что позволяет отделить внутренние дефекты от поверхностных шумов. Ещё одним информативным параметром может служить геометрический размер дефекта  $h$ , анализируя который можно разделить сигналы от внутренних царапин и небольших трещин и внутренние дефекты значительного объёма и площади. Таким образом, можно перейти к многомерному пространству диагностических признаков, что позволит оце-

нить степень различия соответствующих статистических распределений более достоверно.

Важным условием при выборе дополнительных информативных параметров является их слабая взаимосвязь. На данный момент практически не проводилось исследований в направлении статистической оценки степени корреляции различных информативных параметров активного теплового контроля. Соответственно, отсутствуют регрессионные модели, описывающие характер связи определенного информативного параметра с конкретной характеристикой дефекта, например, размером или глубиной залегания. Статистическая оценка результатов теплового контроля позволит определить либо разработать методы, позволяющие решать задачи тепловой дефектометрии и томографии, относящиеся к классу обратных задач НК.

Для проведения статистического анализа взаимосвязей между оптимальным временем контроля  $\tau_{opt}$ , максимальным значением дифференциального температурного сигнала  $\Delta T_{max}$ , глубиной залегания дефектов  $l$  и размером дефектов  $h$  было проведено компьютерное моделирование активного теплового контроля алюминиевой пластины толщиной 10 мм. Модель пластины содержит внутренние искусственные дефекты различных размеров и залегающие на разных глубинах. Компьютерное моделирование проводилось в программе COMSOL Multiphysics. Пластина нагревалась тепловым потоком мощностью 10 кВт на протяжении 0,3 с. Всего записана последовательность из 50 термограмм. Обработка и оценка результатов моделирования проводилась в программном пакете MATLAB.

Из множества результатов были сделаны выборки объемом по 15 элементов. Полученные результаты измерений распределены по нормальному закону. Была проведена оценка степени корреляции между информативными параметрами и характеристиками дефектов. Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  и построены корреляционно-регрессионные модели, определяющие вид установленных взаимосвязей. Также проведен дисперсионный анализ полученных результатов. Исследовалась степень влияния  $\eta$  глубины залегания и размера дефектов на  $\tau_{opt}$  и  $\Delta T_{max}$ . Результаты статистического анализа сведены в таблицу 1.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод про наличие выраженных взаимосвязей и сильного взаимного влияния между всеми рассмотренными факторами. Характер связей преимущественно нелинейный, линейная связь наблюдается только между информативными параметрами и геометрическим размером дефектов. Такие результаты демонстрируют сложность однозначной интерпретации данных теплового кон-

троля. Присутствие уверенной корреляции между рассмотренными параметрами затрудняет их использование для решения задач тепловой дефектометрии с высокой достоверностью. Однако, оптимальное время наблюдения сильно зависит от глубины залегания дефектов и в меньшей степени от размера дефектов. В то же время, максимальное значение температурного сигнала в меньшей степени зависит от глубины залегания дефектов. Эту зависимость можно учитывать при построении тепловых томограмм.

Таблица 1. Результаты статистического анализа данных теплового контроля

| Параметр              | $\tau_{opt}$                                            | $\Delta T_{max}$                                         |
|-----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Глубина залегания $l$ | $r = 0,963$<br>$\eta = 91,89\%$<br>связь: показательная | $r = -0,793$<br>$\eta = 99,23\%$<br>связь: показательная |
| Размер дефекта $h$    | $r = 0,544$<br>$\eta = 32,05\%$<br>связь: линейная      | $r = 0,998$<br>$\eta = 96,29\%$<br>связь: линейная       |
| $\tau_{opt}$          |                                                         | $r = -0,564$<br>связь: гиперболическая                   |

Наиболее выраженной можно считать линейную зависимость  $\Delta T_{max}$  от размера дефектов. Данный факт можно использовать при сравнении толщины дефектов, имеющих одинаковую глубину залегания и площадь теплового отпечатка. При этом получение количественной оценки параметров дефекта остаётся затруднительным.

Результаты статистического анализа подтверждают необходимость поиска новых информативных параметров теплового контроля. Это могут быть фазовые или мощностные характеристики температурного сигнала, получаемые в результате применения преобразования Фурье. Такой подход уже используется в методе импульсной фазовой томографии, однако требует дальнейшего изучения [3].

Перспективность многопараметрического подхода к интерпретации результатов теплового контроля осложняется значительным уровнем шумов, которые в особенности присутствуют в многослойных объектах. Даже незначительная неравномерность нагрева может существенно повлиять на достоверность полученных результатов. Учитывая наличие взаимосвязей сложного характера между всеми информативными параметрами теплового НК, на практике традиционный статистический анализ данных является малоэффективным. Например, во многих случаях построение разделяющей гиперплоскости в многомерном пространстве признаков является затруднительным в связи с описанными выше причинами.

Описанные закономерности приводят к необходимости поиска новых методов обработки данных теплового контроля. Перспективным статистическим методом выглядит метод анализа главных компонент, позволяющий значительно снизить размерность исходных данных и повысить соотношение сигнал/шум на термограммах путём исключения из рассмотрения взаимосвязанных и малоинформативных параметров. Большой интерес также представляет изучение возможностей применения искусственных нейронных сетей для обработки термограмм.

УДК 620.1.05(045)(476)

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ В БЕЛАРУСИ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ Найдёнова В.И., Василович О.В.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в промышленно развитых странах наиболее эффективным инструментом оценки уровня качества измерений и испытаний признана проверка квалификации (proficiency testing). Под проверкой квалификации понимают оценивание деятельности участника по предварительно установленным критериям посредством межлабораторных сличений.

Деятельность по организации и проведению проверок квалификации выполняется провайдерами программ ПК и является международно-признанной практикой и определена международным стандартом ISO/IEC 17043:2010.

Белорусский государственный институт метрологии оказывает услуги по организации межлабораторных сличений с 1993 года, практически с начала создания Национальной системы аккредитации Республики Беларусь. В это время БелГИМ являлся уполномоченным органом по аккредитации лабораторий.

В 2000 году были разработаны национальные стандарты, основанные на международных руководствах ИСО/МЭК 43.

В период с 2000 по 2007 годы в стране сформировалась сеть органов по аккредитации (наравне с БелГИМ органами по аккредитации лабораторий были назначены 6 центров стандартизации, метрологии и сертификации), которые наряду с оценкой лабораторий осуществляли деятельность по межлабораторным сличениям.

В 2010 году создана рабочая группа по межлабораторным сличениям НТК Метр Межгосударственного Совета по стандартизации СНГ.

В 2011 году, в связи с созданием в Республике Беларусь единого органа по аккредитации – Белорусского государственного центра аккредитации, деятельность по аккредитации была откреплена от БелГИМ и центров

## Литература

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М. : ИД Спектр, 2013. – 544 с.
2. Maldague X., Galmiche F. Advances in pulsed phase thermography // *Infrared Physics & Technology*. – 2002. – Vol. 43. – pp. 175–181.
3. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В. Применение Фурье-анализа и метода анализа главных компонент для обработки данных динамического теплового контроля // *Известия ТПУ*. – 2008. – № 2. – С. 279–285.

стандартизации, метрологии и сертификации. Однако эти организации продолжили деятельность по проведению программ про-верок квалификации лабораторий. В 2011 году БелГИМ официально назначен Госстандартом Республики Беларусь провайдером проверки квалификации поверочных, калибровочных и испытательных лабораторий.

В 2013 году БелГИМ совместно с Уральским научно-исследовательским институтом метрологии разработал межгосударственный стандарт ГОСТ ISO/IEC 17043-2013, степень гармонизации которого с международным стандартом – IDT. Таким образом, деятельность по проведению проверок квалификации на пространстве СНГ и ЕАЭС осуществляется в соответствии с международными требованиями.

На этапе развития деятельности по проверке квалификации в период с 2012 по 2017 годы в Республике Беларусь, как и в ряде стран ЕАЭС и СНГ, Госстандартом Республики Беларусь было принято решение поручить выполнение работ организациям государственной метрологической службы (ГМС), как наиболее оснащенным в техническом плане и подготовленным в практических вопросах выполнения отдельных видов измерений и испытаний, и профильным компетентным организациям. Таким образом, в этот период в стране сформировалась сеть компетентных провайдеров проверки квалификации, декларирующих соответствие своей деятельности требованиям ISO/IEC 17043.

С целью обеспечения и организации деятельности по проверкам квалификации, с учетом Протокола о признании результатов работ по аккредитации органов по оценке соответствия, Протокола о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений и на основании Решения Коллегии ЕЭК от 26.01.2016 № 12, приказом

Госстандарта Республики Беларусь от 08.02.2017 № 19 Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии» назначено Уполномоченным органом по научно-методическому обеспечению и координации деятельности по организации проверок квалификации, организуемых провайдером Республики Беларусь (далее – уполномоченный орган). Кроме того, БелГИМ является уполномоченным органом, осуществляющим координацию работ по планированию, организации и проведению межгосударственных программ проверки квалификации в рамках договоренностей в МГС в соответствии с РМГ 134-2015 Проверка квалификации лабораторий посредством межгосударственных межлабораторных сравнительных испытаний. Планирование и организация.

БелГИМ, как уполномоченный орган, действует на основании Положения об уполномоченном органе, утвержденного Госстандартом Республики Беларусь от 31.03.2017, разработал Политику, устанавливающую основную концепцию реализации своих функций.

С 2017 года начался пересмотр законодательства в области обеспечения единства измерений и оценки соответствия, в том числе, по вопросам межлабораторных сличений.

В 2018 году впервые в Республике Беларусь организация, осуществляющая деятельность по проверкам квалификации лабораторий, а именно, Белорусский государственный институт метрологии, получил статус аккредитованного Провайдера проверки квалификации. Оценка компетентности БелГИМ, как Провайдера проверки квалификации, в Национальной системе аккредитации проведена с участием действующих технических экспертов в области проверки квалификации Уральского научно-исследовательского института метрологии.

В соответствии с Политиками международных и региональных организаций в сфере аккредитации, таких, как ILAC, EA, APLAC, для целей аккредитации принимаются в первую очередь результаты участия лабораторий в программах проверки квалификации Провайдеров, аккредитованных на соответствие ISO/IEC 17043.

На современном этапе развития международного сотрудничества в Евразийском экономическом союзе в праве ЕАЭС включены обязательные требования, как по участию лабораторий в межлабораторных сличениях для целей проверки квалификации в соответствии с Протоколом о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений (приложение N 10 к Договору о ЕАЭС), и в целях реализации Протокола о признании результатов работ по аккредитации

органов по оценке соответствия (приложение N 11 к Договору о ЕАЭС), так и требования в отношении провайдеров ПК, для которых внедрение в деятельность ГОСТ ISO/IEC 17043 является обязательным.

БелГИМ как уполномоченный орган по координации и научно-методическому обеспечению программ проверки квалификации выполняет мероприятия для решения приоритетных для государства и бизнеса задач:

1. В целях реализации условий Договора о ЕАЭС, в соответствии с Протоколом о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений, на основании Решения Коллегии ЕЭК от 06.12.2016 № 161 начиная с 2017 года БелГИМ формирует Государственный информационный фонд в области ОЕИ [www.oei.by](http://www.oei.by). Раздел «Проверка квалификации лабораторий и межлабораторные сличения» в Национальном информационном фонде в области обеспечения единства измерений Республики Беларусь включает сведения о компетентных провайдерах проверки квалификации Государственной метрологической службы, которые выполняют программы проверки квалификации в сферах деятельности законодательной метрологии и результаты которых применяются органом по аккредитации – БГЦА для оценки компетентности лабораторий с целью аккредитации в соответствии с Соглашением о сотрудничестве между БелГИМ и БГЦА.

База программ проверки квалификации включает информацию обо всех действующих программах проверки квалификации провайдеров Республики Беларусь.

Календарь программ проверки квалификации позволит пользователю выбрать необходимую программу по требуемому направлению деятельности в требуемые сроки реализации и предоставит информацию о провайдере этой программы.

Программы, включенные в Государственный информационный фонд в области ОЕИ Республики Беларусь, гарантируют потребителям программ проверки квалификации высокий уровень компетентности их реализации.

2. БелГИМ, как уполномоченный орган по проверкам квалификации, осуществляет координацию программ проверки квалификации под технические регламенты ЕАЭС и межгосударственных программ проверки квалификации.

Программы проверки квалификации, реализуемые для целей оценки лабораторий, осуществляющих испытания продукции на соответствие требованиям технических регламентов ЕАЭС, а также отчеты по реализации таких программ размещаются на официальном сайте Евразийской экономической комиссии.

Программы проверки квалификации, имеющие статус межгосударственных программ, одобряются НТК Метр и утверждаются на ежегодных заседаниях МГС.

В программах проверки квалификации ЕАЭС и МГС наряду с лабораториями Республики Беларусь ежегодно принимают участие лаборатории государств-членов.

3. Белорусский государственный институт метрологии является координатором от Республики Беларусь в международной базе программ проверок квалификации EPTIS.

EPTIS ([www.eptis.org](http://www.eptis.org)) является совместным проектом Всемирной ассоциации провайдеров проверки квалификации. Провайдеры проверки квалификации поддерживают свой международный статус посредством регистрации в EPTIS программ проверок квалификации. Регистрация в базе EPTIS позволяет повысить статус программ проверки квалификации, поскольку в базу включаются только проверенные и одобренные членами EPTIS программы.

В настоящее время в базе EPTIS зарегистрированы провайдеры проверки квалификации из 50 стран, база включает более 3900 программ ПК. Доступ в EPTIS открыт только для провайдеров проверки квалификации стран, которые зарегистрировали организационного координатора в EPTIS. Координаторы проверяют правильность предоставленных данных на соответствие ISO/IEC 17043 и принимают решение об их публикации в EPTIS. Это помогает обеспечить необходимый уровень качества базы данных EPTIS.

4. Для решения вопроса о регулировании деятельности по межлабораторным сличениям, включая проверку квалификации лабораторий, а также с целью гармонизации законодательства Республики Беларусь с Договором о ЕАЭС, БелГИМ выступил с инициативой о внесении изменений в Закон РБ Об оценке соответствия и аккредитации органов по оценке соответствия и в Закон РБ Об обеспечении единства измерений, которые касаются:

– уполномочивания Госстандартом РБ Национального метрологического института на осуществление функций координирующей организации по межлабораторным сличениям, в том числе по проверкам квалификации;

– введение в Закон РБ Об Об обеспечении единства измерений статьи межлабораторные сличения;

– внесения изменений в Закон РБ Об оценке соответствия и аккредитации органов по оценке соответствия в части обязательного участия испытательных лабораторий в межлабораторных сличениях с целью проверки квалификации.

5. Руководствуясь Декларацией Международных организаций в сфере метрологии и

аккредитации, таких как Международное бюро мер и весов (BIPM) и Международное сотрудничество по аккредитации лабораторий (ILAC), БелГИМ и БГЦА подписали Соглашение о сотрудничестве между Республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный институт метрологии» и Республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный центр аккредитации» от 01.06.2017 года (далее – Соглашение). Соглашение касается взаимноинтересующих вопросов обеспечения метрологической прослеживаемости, применения результатов проверки квалификации лабораторий для целей аккредитации, формирования единой базы программ ПК в Государственном информационном фонде в области обеспечения единства измерений Республики Беларусь, поддержания компетентности оценщиков органа по аккредитации.

6. С целью выполнения плана мероприятий по реализации Концепции развития государственной метрологической службы до 2020 года, утв. Постановлением Госстандарта от 27.12.2016 №93, решения Коллегии Госстандарта (протокол от 10.02.2017 №10), БелГИМ, как уполномоченный орган, в 2017 году:

– провел анализ потребности страны в проверках квалификации и определил наиболее востребованные направления программ проверок квалификации в сферах поверки/калибровки, испытаний/измерений;

– выполнил оценку уровня измерений и испытаний и определил наиболее проблемные сферы деятельности лабораторий, которые требуют пристального внимания и проведения корректирующих мероприятий для повышения уровня компетентности, и сферы, в которых риски в отношении компетентности минимизированы;

– провел анализ негативных тенденций в деятельности лабораторий посредством участия в ПК, на основании которого установил основные источники рисков;

– осуществил анализ программ и отчетов провайдеров ПК, на основании которого систематизировал несоответствия в деятельности провайдеров, и провел разъяснительную работу по устранению этих несоответствий.

Деятельность провайдеров проверки квалификации базируется на измерительных и испытательных возможностях аккредитованных лабораторий и производителей стандартных образцов. На примере БелГИМ, как провайдера проверки квалификации, базой технической компетентности провайдера являются наилучшие измерительные и калибровочные возможности БелГИМ, которые подтверждены данными в КСДВ и свидетельством техни-

ческой компетентности КОOMET на проведение измерений и изготовление стандартных образцов, области аккредитации аккредитованных в Национальной системе аккредитации испытательных лабораторий БелГИМ и аккредитованных лабораторий, с которыми БелГИМ заключил договоры на научно-техническое сотрудничество.

Сегодня провайдеры проверки квалификации нашей страны предлагают более 350 программ проверки квалификации для испытательных лабораторий, около 100 для поверочных и калибровочных лабораторий.

Как показал мониторинг рынка услуг по проверкам квалификации наибольшую заинтересованность со стороны лабораторий вызывают такие сферы деятельности (рис. 1), как:

- безопасность пищевой и сельскохозяйственной продукции;
- охрана окружающей среды;
- охрана труда и промышленная санитария;
- неразрушающий контроль;
- строительные материалы и конструкции;
- электробезопасность электрооборудования.

Востребованность в этих секторах промышленности связана с выполнением работ в сфере законодательной метрологии и заинтересованностью государства в получении достоверных результатов измерений в регулируемых государством областях.



| № | направление                                | кол-во туров | №  | направление                          | кол-во туров |
|---|--------------------------------------------|--------------|----|--------------------------------------|--------------|
| 1 | транспортные средства                      | 1            | 7  | безопасность пищевой и с/х продукции | 17           |
| 2 | безопасность изделий, машин и оборудования | 3            | 8  | металлы и сплавы, НК                 | 19           |
| 3 | продукция легкой промышленности            | 3            | 9  | молоко и молочная продукция          | 35           |
| 4 | оптоволокно и кабели                       | 12           | 10 | строй. материалы, мебель             | 26           |
| 5 | мед. препараты, фарм. продукция            | 9            | 11 | ООС                                  | 18           |
| 6 | нефтепродукты, газы                        | 18           | 12 | ОТ, физ. факторы                     | 33           |
|   |                                            |              | 13 | ЭФН                                  | 55           |

Рисунок 1 – участки ПК по направлениям деятельности

При реализации программ проверки квалификации активно используется эталонная база Республики Беларусь.

БелГИМ как национальный метрологический институт Республики Беларусь прошел оценку со стороны экспертов КОOMET и имеет подтверждение соответствия деятельности в области измерений требованиям ИСО/МЭК 17025 и в области изготовления стандартных образцов требованиям ИСО Guide 34. Кроме того, БелГИМ аккредитован в области испытаний средств измерений, ЭМС, низковольтного

оборудования, товаров народного потребления, пищевой и сельхозпродукции, радиационного контроля Белорусским государственным центром аккредитации на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Всё это свидетельствует о высоком статусе национального метрологического института нашей страны в международном метрологическом сообществе.

Таким образом, в части применения измерительных возможностей БелГИМ можно отметить следующее.

Для проведения программ ПК в области охраны окружающей среды применяются стандартные образцы газовых смесей, которые изготавливаются в соответствии с международным стандартом ИСО 6142.

Программы проверки квалификации в области радиационного контроля продукции и объектов окружающей среды основаны на применении стандартных образцов удельной активности радионуклидов. В зависимости от региона Беларуси радионуклидный состав и уровень загрязненности меняются в различных природных средах. В связи с этим появляется уникальная возможность, используя природные объекты, создавать матричные стандартные образцы, загрязненные различными радионуклидами.

В сфере охраны труда при проведении проверок квалификации активно используется эталонная база БелГИМ. При проведении ПК по измерению шумовых характеристик применяется эталонный источник звука и устанавливается метрологически прослеживаемое опорное значение измеряемой величины.

Стандартные образцы состава молока (массовая доля жира, массовая доля белка, количество соматических клеток), которые применяются в программах ПК, являются совместной разработкой БелГИМ и Областной лабораторией по определению качественных показателей молока (п. Майск, Ивацевичского р-на Брестской обл.).

Применение эталонной базы национального метрологического института для целей проверок квалификации позволяет получить опорные значения измеряемых величин, которые метрологически прослеживаются до SI, что является наиболее важным критерием реализации программ ПК.

БелГИМ открыт для сотрудничества с лабораториями-заявителями для наибольшего охвата секторов промышленности проверками квалификации с целью реализации требований Договора о ЕАЭС и повышению качества оценки соответствия и конкурентоспособности продукции.

Концептуальный подход в отношении развития деятельности по организации проверок квалификации лабораторий, тесное сотруд-

ничество Белорусского государственного института метрологии и Белорусского государственного центра аккредитации по вопросам реализации программ ПК, организуемых провайдером Республики Беларусь, позволит:

– реализовать требования международного сообщества в сфере метрологии и аккредитации, которое рассматривает проверки квалификации, как важный аспект, участвующий в сопоставимости измерений;

– выполнить важное условие снятия технических барьеров при обращении продукции в странах-партнерах ЕАЭС, определенное в Договоре о ЕАЭС и документах 2-го уровня;

– охватить проверками квалификации наиболее востребованные сферы деятельности и удовлетворить потребности органов государственного управления и промышленности в компетентной оценке соответствия продукции.

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЦИЛЛЯТОРА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Омелян А.В.<sup>1</sup>, Петренко С.Ф.<sup>1</sup>, Новаковський О.Г.<sup>2</sup>, Антонюк В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное предприятие ООО «Лилея», Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Манипулятор – это неотъемлемый инструмент в медикобиологической технике, например для выполнения микроопераций на клеточном уровне, мембранные технологии, технологии для искусственного оплодотворенной и т. д. Такие манипуляторы могут широко использоваться и в других областях, например в электронной, химической промышленности и т. д. [1, 2].

В последние 40 лет моторизованные микроманипуляторы строились по стандартной схеме конвертации вращательного движения двигателя (шагового или постоянного тока) в поступательное движение линейной каретки, напр. микроманипуляторы PSF-3, PSF-3 IVF [3].

Эта довольно сложная схема выдвигала жесткие требования к узлам конвертации вращательного движения в поступательное. Такие схемы достаточно сложные и практически не подвергаются дальнейшей миниатюризации и удешевлению. Они имеют ограниченный диапазон по скорости и линейному перемещению.

Предложенный микроманипулятор выполнен по принципиально новой схеме с непосредственным сообщением пьезоэлектрического актюатора с прецизионной стандартной направляющей, которая была элементом самого двигателя. Все корпусные элементы микроманипулятора были изготовлены с использованием технологии 3D печати. Направляющая выполнена на базе трех линейных подшипников LM3U. Это значительно уменьшило размер манипулятора и расширило его диапазон перемещения. Микроманипулятор был свободным от мертвого хода и гистерезиса. Микроманипулятор представляет три линейных двигателя, которые были соединены между собой с помощью переходных кронштейнов.

Две нижние координаты X и Y, а верхняя – Z. Двигатели оснащены линейными энкодерами с уровнем разрешения 2 мкм.

Каждая координата установлена непосредственно на направляющую или основу соответствующего двигателя.

Таким образом, основой манипулятора основа нижнего двигателя (координата X), второй двигатель (координата Y) был установлен на направляющую первого двигателя.

Третий двигатель (координата Z) был установлен на направляющую второго двигателя.

Рабочей платформой манипулятора является направляющая третьего двигателя – координата Z.

Такая компоновка обеспечила значительное уменьшение массо-габаритных параметров (масса 180 г), жесткость конструкции и стабильность движения в микропространстве.

На практике качество пьезоэлектрического двигателя проверяется путем измерения параметров его электрического резонанса, то есть измерения зависимости тока потребления двигателя от частоты возбуждения пьезоэлектрического резонатора [1].

Этот параметр в значительной степени определяет как скорость пьезоэлектрического двигателя, так и его момент или силу. В зависимости от резонансной характеристики выбирается частотная рабочая точка двигателя – левый или правый ее склон [4].

Также эта зависимость является главным параметром для драйвера пьезоэлектрического двигателя. Все эти свойства в значительной степени зависят как от материала пьезоэлектрического резонатора, так и его геометрических размеров.

При серийном изготовлении пьезоэлектрических резонаторов в значительной степени важно знать допуски на геометрические размеры при изготовлении резонатора.

Поэтому, в предлагаемой работе рассматривается стенд для контроля резонансных характеристик осцилляторов (резонатор с элементами



крепления в составе двигателя) с целью выявления влияния геометрических допусков резонаторов при их изготовлении на резонансную характеристику.

Структурная схема стенда представлена на рис. 1. Стенд включал в себя последовательно соединенные персональный компьютер (ПК), преобразователь USB-UART, микроконтроллер (МК), усилитель сигналов генератора возбуждения, двигатель с исследуемым осциллятором.

Измеритель тока подключен к усилителю сигналов генератора возбуждения и микроконтроллера.

Работа стенда осуществлялась следующим образом. ПК посылал параметры измерения на МК PIC16F18325, таких как диапазон заданных частот, шаг изменения частоты генератора и время удержания частоты генератора.

После этого МК генерировал сигнал возбуждения для пьезоэлектрического двигателя с начальной частотой, соответствующей правой границе заданного диапазона частот. Этот сигнал поступал на блок усиления сигналов генератора возбуждения для усиления выходной мощности, а дальше на двигатель.

Измеритель тока потребления двигателя был реализован на шунтовом резисторе с последующим усилением напряжения на нем по использованию операционного усилителя LMV321 1LT.

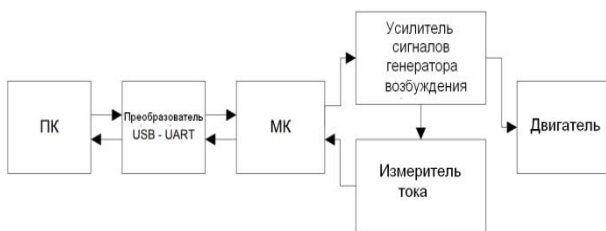


Рисунок 1 – Структурная схема стенда

Выходной сигнал усилителя фильтровался низкочастотным RC-фильтром. Отфильтрованный сигнал был оцифрован с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой  $\sim 31$  кГц, встроенного в МК. Измерение продолжалось в течение указанного временного параметра, такого как время удержания частоты генератора.

После этого полученное значение тока и значение частоты генератора были направлены на ПК. Частота генератора уменьшалась на значение, которое соответствовало параметра шага изменения частоты генератора.

Далее измерения выполнялось повторно до тех пор, пока частота генератора не станет равной левой границы заданного диапазона частот.

После завершения измерения ПК выполнял расчеты тока, хранил полученные данные в файл и строил график зависимости тока от частоты возбуждения пьезоэлектрического двигателя.

В работе исследовались прямоугольные плоские резонаторы малогабаритного пьезоэлектрического двигателя PM-510R [5] с характерными размерами резонатора 10 мм.

Исследовались две группы резонаторов:

- группа I с допуском изготовления резонаторов 50 мкм;
- группа II с допуском изготовления резонаторов 200 мкм.

Результаты тестирования резонаторов представлено на рис.3 (шаг изменения частоты генератора  $\sim 75$  Гц, время удержания частоты генератора – 100 мс, количество измерений усреднения  $\sim 3100$ , количество измерений в диапазоне частот  $\sim 400$ ).

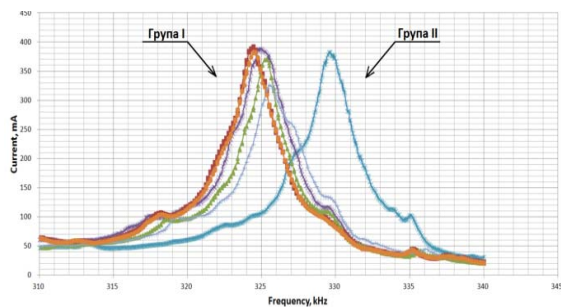


Рисунок 2 – Резонансные характеристики осцилляторов с различным геометрическим допуском их изготовления

Из результатов исследования видно (Рис. 2), что расхождение по резонансной частоте резонаторов группы I и группы II составляла около 5 кГц хорошо согласовывалось с теоретическими оценками.

Таким образом, было подтверждено работоспособность такого стенда для применения его при серийном производстве пьезоэлектрических двигателей, а конструкция микроманипулятора подтвердила возможность его использования как в клеточных технологиях, так и в качестве микроробота для различных применений в области микротехнологий.

### Литература

1. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении / С.Ф. Петренко. – Корнійчук, 2002. – С. 96.
2. Антонюк В.С. Підвищення точності позиціонування лінійних направляючих мікрomanipуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном / В.С. Антонюк., А.В. Белова, С.Ф. Петренко // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць Харків: НТУ «ПШ», 2008. – Вип. 2 (17). – С. 12–20.
3. Piezo Technologies [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Киев : Piezo Technologies, 1992– 2018. – Режим доступа: [www.piezotech.com.ua](http://www.piezotech.com.ua).

4. Петренко С.Ф., Омелян А.В., Анто-  
нюк В.С., Новаковский О.Г «Система керування  
п'єзоелектричним двигуном» / Вісник НТУУ  
«КПІ». Серія Приладобудування. – 2018. –  
Вип. 55. – С. 5–10.

5. Digital International Technology [Электрон-  
ный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные дан-  
ные. – USA: Digital International Technology,  
2017. – Режим доступа: www.dtimotors.com.

УДК 615.849.11: 615.032

## ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ТРАНСКУТАННОМ МЕТОДЕ ВВЕДЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ Паньков С.Б., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт  
имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

На сегодняшний день все большее внимание стали уделять неинвазивным технологиям транскутанного введения фармацевтических препаратов (ФП) в организм человека. Толчком для этого стали устаревшие методики введения лекарственных средств, которые имеют существенные недостатки и вредное действие на организм пациента.

Благодаря научным исследованиям биофизических особенностей поверхностных слоев кожи при воздействии различных физических факторов и совершенства современных медицинских аппаратов появилась возможность доставлять активные субстанции через кожные покровы (рогового слоя, эпидермиса, дермы) достигая значительного проникновения в глубинные слои ткани, с не меньшей эффективностью, чем в случае инъекций с помощью шприца [1].

Транскутанная доставка, по сравнению с доставкой через кровяное русло, позволяет избежать нежелательных побочных эффектов, снизить эффективную дозу препарата за счет существенного повышения его локальной концентрации. Если для препаратов, попадающих в организм перорально или в результате инъекции, увеличение концентрации во времени описывается характерной кинетической кривой первого порядка (концентрация экспоненциально увеличивается во времени), то в случае использования трансдермальных методов наблюдается идеальная временная зависимость нулевого порядка (равномерное увеличение концентрации препарата во времени). Это позволяет более точно планировать дозировки препарата и пролонгировать его действие [2].

Ключевой проблемой транскутанной доставки является затруднения при проникновении ФП через кожу. На основании информации о строении кожного покрова можно сделать вывод, что транскутанная доставка будет эффективной при условии, если ФП, преодолев эпидермис, поступит в достаточном количестве в дерму, где расположены капилляры кровеносных сосудов. Для того чтобы преодолеть роговой слой кожи, являющийся основной барьерной функцией покровов тела на практике используются методы физического и химического воздействия.

Стрелками на рис.1 показаны возможные пути проникновения веществ через кожу – как с помощью пассивного переноса, так и под действием физических и химических факторов.

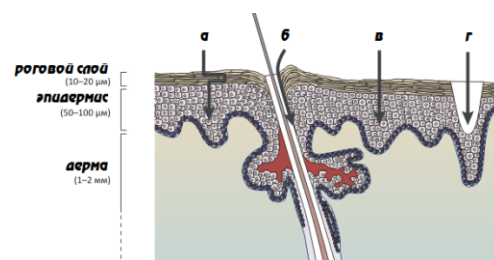


Рисунок 1 – Пути чрескожной диффузии лекарственных веществ при трансдермальной доставке: а – трансэпидермальный; б – трансфолликулярный / трансдуальный; в – чресклеточный; г – через созданные микроотверстия

Рассмотрим рис.1, на котором *трансэпидермальный* или «извилистый» путь трансдермальной диффузии может быть облегчен с помощью химических энхансеров – веществ, сравнительно легко преодолевающих липидный барьер и «увлекающих» за собой молекулы доставляемого лекарства. Низковольтный ионофорез облегчает проникновение веществ *трансфолликулярным путем* – через волосяные фолликулы и протоки потовых желез. Высоковольтная электропорация временно дестабилизирует липидные бислои, «приоткрывая» дверь доставляемому веществу. Сонофорез (влияние ультразвуком) дополнительно может увеличить эффективность путей переноса а, б и г. *Микроиглы* и *термопорация* создают в коже отверстия микронного размера, через которые может осуществляться транспорт. Из-за малости отверстий, эти процедуры безболезненны, а сами отверстия очень быстро затягиваются [3].

На сегодняшний день частично реализованы возможности доставлять активные субстанции через кожные покровы достигая значительного проникновения в глубокие слои ткани с использованием ультразвука (УЗ). Это позволяет создать высокую концентрацию препарата в локальной зоне и являться наиболее эффективными, когда

нужно депонировать препарат для его пролонгированного действия, например, при боли в суставах или позвоночнике. Прием таблеток и даже уколы такой эффект не дают [4].

Увеличение проницаемости кожи и клеточных мембран, усиление диффузных процессов под влиянием ультразвуковых колебаний рядом с активацией в организме физиологических процессов послужили основанием для использования УЗ для ввода и повышение проницаемости лекарственных веществ через неповрежденную кожу и слизистые оболочки [5].

Перспективным направлением для диагностики и медико-биологических исследований проницаемости биологической ткани является измерение зависимости глубины проникновения фармакологических препаратов в биоткань от параметров (частота, интенсивность, время действия) ультразвуковых колебаний.

В работе [1] авторы определяли зависимость от параметров воздействия ультразвуковых колебаний (генерируемых физиотерапевтическим аппаратом «УЗТ-1.01-Ф» с рабочей частотой 880 кГц) на проникновение и распространение различных фармакологических препаратов в биологическую среду.

При повторном эксперименте генератором ультразвуковых колебаний был взят аппарат для физиотерапии, комбинированный «МИТ-11» с рабочей частотой 44кГц. Влияние ультразвука на процессы внедрения лекарственных веществ в биологические ткани производилось путем измерения глубины проникновения ( $H_{\max}$ ) лекарственного вещества (растворы йода, бриллиантовый зеленый, перманганата калия) в образцы.

Глубина проникновения красящего вещества (бриллиантовый зеленый) вглубь образца составила  $H_{\max} = 1$  мм (рис. 2). При озвучивании, например, лекарственного вещества бриллиантовый зеленый ( $C_{27}H_{34}N_2O_4S$ ) в непрерывном режиме глубина проникновения уже составила  $H_{\max} = 4$  мм (рис. 3). Следовательно, ультразвуковые колебания увеличили проникновение раствора в 4 раза.



Рисунок 2 – Образец с проникновением красящего вещества



Рисунок 3 – Образец с проникновением красящего вещества с использованием УЗ

Нами исследовалась математическая модель взаимодействия ультразвука с биологической тканью. Установлена зависимость толщины  $l(\tau)$  мембраны от  $t$  – время диффузии в мембране

(эквивалентная времени излучения),  $K$  – параметр учитывающий тип биологического вещества,  $B$  – параметр действующего УЗ (частота, интенсивность),  $\tau$  – постоянная времени для мембраны; диффузный потенциал  $E$  эквивалентного энергии излучения, постоянной Фарадея  $F$ , универсальной газовой постоянной  $R$ , температуры  $T(\tau)$ , потенциалов концентрации ионов  $u_k, u_a$ :

$$l(\tau) = -\frac{\tau}{t} \cdot K \cdot B \cdot \ln\left(1 - \exp\left(\frac{-E \cdot F}{R \cdot T(\tau)} \cdot \frac{u_k + u_a}{u_k - u_a}\right)\right)$$

Так, контролируя значение температуры биологической ткани  $T(\tau)$  можно прогнозировать изменения толщину мембраны  $l(\tau)$  клеток. А по ее значению определять величины проницаемости веществ в клетку.

Таким образом, возможно отслеживать значения времени излучения нормированных параметров ультразвука (при неизменной частоте и интенсивности УЗ волны), необходимые для достижения максимально допустимого эффекта, принимая за реакцию клетки изменение проницаемости мембраны [5].

При оценке влияния параметров ультразвуковых колебаний на проницаемость фармацевтических параметров в биологическую ткань установлено, что глубина проницаемости фармацевтических препаратов зависит, прежде всего, от параметров ультразвука: повышение интенсивности ультразвука ведет к увеличению глубины проницаемости; уменьшение частоты ультразвука сопровождается повышением его форетичной активности (способность вещества проникать в кожные слои) и введением в организм большого количества ФП.

### Литература

1. Паньков С.Б., Терещенко М.Ф. Залежність параметрів проникнення фармакологічних препаратів у біологічну тканину від дії ультразвукових коливань різної інтенсивності // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Частина 1 – 2018. – № 4. – Том 29(68). – С. 61–67.
2. Hughes G.A. Nanostructure-mediated drug delivery // Nanomedicine. – 2005. – № 1. – С. 22–30.
3. Чугунов А.О. Доставка лекарств через кожу: обзор современных и будущих подходов // Косметика и медицина – 2008. – № 2. – С. 72–79.
4. Паньков С.Б. Терещенко Н.Ф. Эффективность применения ультразвука при транскутанном методе введения лекарственных препаратов / С.Б. Паньков, Н.Ф. Терещенко // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11 МНТК молодых ученых и студ. 18-20 апреля 2018 г. / Минск, БНТУ. – 2018. – 497 с., С. 77.
5. Улащик В.С. Трансдермальное введение лекарственных веществ и физические факторы: традиции и инновации. – Минск: Беларуская навука – 2017. – С. 266.

УДК 620.19:669.295'24:62-427

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ УЧАСТКОВ ПРОТЯЖЕННОГО ИЗДЕЛИЯ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Рубаник В.В., Рубаник В.В.мл., Петрова-Буркина О.А.

Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Республика Беларусь

Эффект термокинетической ЭДС – явление возникновения ЭДС при нестационарном нагревании однородного металлического участка разомкнутой электрической цепи. При этом обязательным условием возникновения такого рода термоЭДС является реализация фазового превращения в зоне температурного воздействия. Первоначально был обнаружен в однородных вольфрамовой пленке и железной проволоке, в которых фазовые превращения реализуются при температуре 700-800°C [1]. Однако, в ряде материалов фазовые превращения могут протекать при значительно более низких температурах, например, в сплавах, обладающих эффектом памяти формы. Было установлено, что при движении зоны нагрева вдоль проводника (при условии протекания в зоне нагрева фазового перехода) наряду с изменением электронных свойств за счет термоупругого фазового превращения в никелиде титана возникает термокинетическая ЭДС, которая составляет порядка 0,22 мВ [2]. При этом было установлено, что при термоциклировании проволоочных образцов никелида титана состава Ti-50ат.%Ni, значение термокинетической ЭДС падает, и уже после 70-ого цикла термокинетической ЭДС практически не наблюдается. Падение значения термокинетической ЭДС при термоциклировании связано с увеличением плотности дефектов, что приводит в исследуемом образце к снижению характеристических температур и образованию промежуточной R-фазы, которая обладает очень высоким электросопротивлением. Также установлено, что при термоциклировании на зависимостях термокинетической ЭДС от времени появляются два экстремума ЭДС, соответствующих началу и окончанию нагрева образца. В этом случае проявление термоЭДС связывается с существованием областей с различными химическими потенциалами и подобно термоЭДС, возникающей в термопаре [2].

Однако в отдельных случаях в материале наблюдается значительная флуктуация величины термокинетической ЭДС [3]. На рисунке 1 представлены зависимости распределения термокинетической ЭДС по длине образцов Ti-50ат.%Ni диаметром 0,22 и 0,4 мм. Как видно, изменение величины термокинетической ЭДС по длине образца носит повторяющийся характер. При этом для образца диаметром 0,4 мм термоЭДС даже меняет свой знак во втором термоцикле. Такое поведение может быть обусловлено как неоднородностью химического состава проволоки по ее длине, так и наличием дефектов кристаллической решетки или внутренних напряжений.

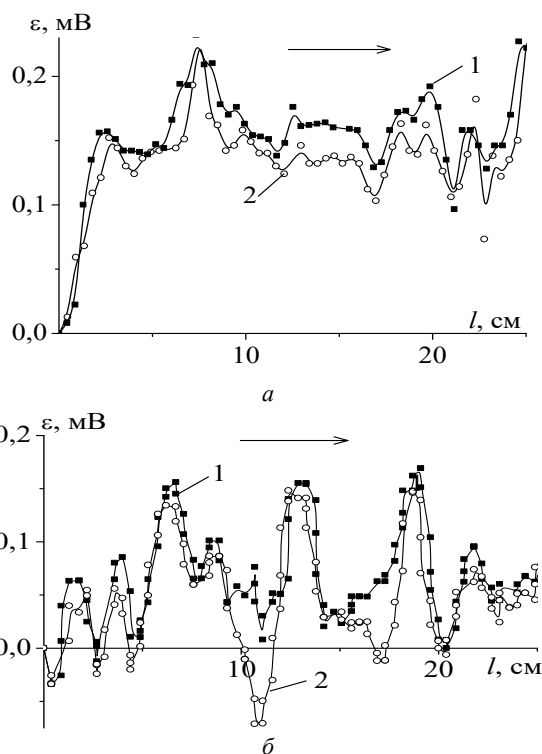


Рисунок 1 – Распределение термокинетической ЭДС по длине образца Ti-50ат.%Ni: а) диаметром 0,22 мм; б) диаметром 0,4 мм (1- 1-ый термоцикл; 2- 2-ой термоцикл). Стрелкой указано направление перемещения зоны нагрева

Таким образом, термокинетическую ЭДС можно использовать в качестве инструмента для контроля качества протяженного изделия из сплава с памятью формы. Исходя из выше сказанного, предложен способ и устройство определения неоднородных участков протяженных изделий из сплавов с памятью формы [4].

Способ заключается в непрерывной регистрации значения термоЭДС на участке, содержащем устройство нагрева выше температуры фазового перехода, при перемотке проволоки. По изменению термокинетической ЭДС определяют участки материала, которые отличаются физическими свойствами и подлежат выбраковке.

Устройство (рисунок 2) работает следующим образом: изделие 6 сматывают с подающего блока 1 и наматывают на принимающий блок 7. Между блоками расположена термостатная камера 4, в которой поддерживается постоянная заданная температура с помощью известных систем регулирования. Два роликовых контакта 2 и 5 для измерения термоЭДС

подключают к изделию, соответственно, на входе и выходе из термостатной камеры 4, где изделие находится при одинаковой температуре, меньшей температуры окончания прямого фазового перехода  $M_k$ , например комнатной. ТермоЭДС непрерывно регистрируют в режиме реального времени.

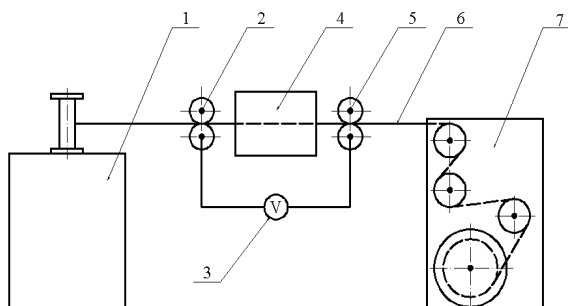


Рисунок 2 – Устройство контроля качества протяженного изделия из сплава с памятью формы  
1, 7 – принимающие блоки; 2, 5 – роликовые контакты;  
3 – вольтметр; 4 – термостатная камера;  
6 – изделие (в нашем случае это проволока)

Предложенные способ и устройство относятся к методу неразрушающего контроля и предназначены для непрерывного контроля качества протяженных изделий, преимущественно проволоки, из сплава с памятью формы и обеспечивают контроль на соответствие требуемым термо-механическим характеристикам.

УДК 066.86

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ, РЕГУЛИРУЮЩИХ ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАМКАХ ТРЕБОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЕВРО-5 И ЕВРО-6

Петрусенко П.А.<sup>1</sup>, Гребень О.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Минский автомобильный завод», Минск, Республика Беларусь

Производители двигателей используют различные технологии для выполнения требований, предъявляемых к двигателям экологического класса Евро-5. На Ярославском и Минском моторных заводах применяется EGR-система, на Mercedes и Cummins – SCR-система. SCR-система – селективная каталитическая нейтрализация. В основу данной технологии положен принцип так называемого селективного каталитического восстановления (Selective Catalytic Reduction, SCR), при котором нейтрализация вредных веществ, содержащихся в отработавших газах, производится целенаправленно в отношении ядовитых окислов азота (NOx). Нейтрализация окислов азота (NOx) производится путем реакции восстановления окислов азота (NOx) до исходных компонентов молекулярного азота (N<sub>2</sub>) и водяного пара (H<sub>2</sub>O). При модернизации компонентов двигателя с целью достижения оптимального КПД и, соответственно, макси-

## Литература

1. Фурмаков, Е.Ф. Электрический ток, вызванный движением поверхности раздела фаз в металле / Е.Ф. Фурмаков // Фундаментальные проблемы естествознания. – Санкт-Петербург, 1999. – Т. 1, вып. 21. – С. 377–378.

2. Rubanik, V.V. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikelide titane upon non-stationary heating / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr, O.A. Petrova-Burkina // Materials Science Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications, 2013. – V. 738–739. – P. 292–296.

3. Рубаник, В.В. Исследование ЭДС в никелиде титана, вызванной нестационарным нагревом / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., О.А. Буркина // 50-й Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности»: сборник материалов, Витебск, 27 сентября – 1 октября 2010 г.: в 2 ч. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2010. – Ч. 2. – С. 208–209.

4. Устройство для измерения термоЭДС на участке протяженного изделия из сплава с памятью формы и способ определения неоднородных участков протяженного изделия из сплавов с памятью формы : пат. 19012 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 25/16 / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., О.А. Петрова-Буркина; заявитель ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси». – № а 20111605; заявл. 28.11.11; опубл. 28.02.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 93.

мальной эффективности, т. е. способности развить максимальную мощность при малом расходе топлива, неизбежно возрастает содержание окислов азота (NOx) в отработавших газах. Если процесс сгорания рассчитать таким образом, чтобы снизить содержание окислов азота (NOx), возрастет расход топлива и как следствие его неполного сгорания – содержание частиц сажи (PM) в выхлопе. Модернизация только компонентов двигателя для одновременного достижения требуемого содержания окислов азота (NOx) и частиц сажи в отработавших газах в соответствии с нормами Евро-5, а также выполнение более жестких экологических норм в будущем технически невозможно. Поэтому автомобили, оборудованные системой SCR, помимо модернизированного двигателя имеют ряд дополнительных компонентов [1], [2], предназначенных для нейтрализации окислов азота (NOx). В качестве восстановителя окислов азота (NOx) в данных автомобилях дополнительно

используется определенный вид рабочей жидкости, которая имеет торговое обозначение AdBlue™ и представляет собой 32,5 % водный раствор мочевины (NH)<sub>2</sub>CO. Данное вещество размещается на автомобиле в специально предусмотренном баке. Жидкость AdBlue™ впрыскивается в горячий отработавший выхлопной газ и подвергается гидролизу при температуре свыше 180 °С с образованием аммиака (NH<sub>3</sub>). Принцип действия SCR-системы следующий:

- при нагреве примерно до 200 °С SCR-глушитель-катализатор достигает рабочей температуры;

- блок управления получает данные о температуре отработавших газов от датчика температуры, установленного в SCR-глушитель-катализаторе;

- раствор мочевины забирается насосом из бака и под давлением перекачивается через трубопровод к форсунке. [1], [2]

Форсунка по команде блока управления впрыскивает мочевину в дозируемом количестве в трубопровод системы отработавших газов перед SCR-глушителем-катализатором и поток отработавших газов переносит мочевину в окислительный катализатор, где она распадается на аммиак (NH<sub>3</sub>) и углекислый газ (CO<sub>2</sub>). После этого образовавшиеся вещества попадают в систему восстановительного катализатора и вступают в реакцию с оксидами азота (NO<sub>x</sub>), образуя азот (N<sub>2</sub>) и воду (H<sub>2</sub>O). Конечным элементом системы SCR является глушитель-катализатор. В катализаторе происходит восстановление образовавшихся при сгорании топлива вредных окислов азота (NO<sub>x</sub>) в исходные безвредные компоненты: азот (N<sub>2</sub>) и воду (H<sub>2</sub>O).

Глушитель выполнен в корпусе из нержавеющей стали внутри которого находится катализатор. Катализатор состоит из набора элементов, каждый из которых представляет собой керамическое пористое вещество в виде сот, поверхность которого имеет напыление каталитических веществ: окиси титана (TiO<sub>2</sub>), окиси вольфрама (WO<sub>3</sub>) и окиси ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). В катализаторе происходит восстановление образовавшихся при сгорании топлива вредных окислов азота (NO<sub>x</sub>) в исходные безвредные компоненты: азот (N<sub>2</sub>) и воду (H<sub>2</sub>O). Глушитель выполнен в корпусе из нержавеющей стали внутри которого находится катализатор. Катализатор состоит из набора элементов, каждый из которых представляет собой керамическое пористое вещество в виде сот, поверхность которого имеет напыление каталитических веществ: окиси титана (TiO<sub>2</sub>), окиси вольфрама (WO<sub>3</sub>) и окиси ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Минусы SCR-системы [1], [2]:

- требуется реагент (AdBlue™);
- инфраструктура;
- стоимость реагента;

- замерзание реагента при температурах ниже минус 11 °С;

- дополнительные элементы системы впрыска реагента, размещенные на автомобиле (дозатор, бак, нейтрализатор).

Плюсы SCR-системы:

- улучшенная топливная экономичность;
- ниже теплоотдача;
- увеличенный интервал замены масла.

EGR-система – рециркуляция выхлопных газов. Система рециркуляции выхлопных газов EGR предназначена для снижения в отработавших газах оксидов азота NO<sub>x</sub> за счет возврата части выхлопных газов во впускной коллектор (примерно 10 % для Евро 3, примерно 20 % для Евро-4). Снижение токсичности с помощью технологии EGR достигается путем понижения содержания избыточного кислорода и понижения максимальных температур в камере сгорания двигателя. В итоге образуется меньше соединенных молекул азота N<sub>2</sub> с атомами кислорода, что приводит к снижению образования NO<sub>x</sub>. Глушитель в системе EGR в своей конструкции имеет катализатор и фильтр твердых частиц (сажевый фильтр). [1]

Минусы EGR-системы:

- требуется низкосернистое топливо (< 50 ppm);

- усложнение конструкции двигателя;
- снижение топливной экономичности;
- выше стоимость двигателя;

- выше теплоотдача (~ 30 % по сравнению с Евро-3);

- требуется фильтр твердых частиц DPF;

- повышенный износ двигателя и повышенная теплонапряженность.

Плюсы EGR-системы: не требуется дополнительный реагент.

В перспективе в соответствии с экологическими стандартами, регулирующими содержание вредных веществ в выхлопных газах планируется выпуск двигателей Евро-5 и Евро-6. Требования экологического стандарта Евро-6 по сравнению с предыдущим стандартом Евро-5 направлены на снижение двух видов вредных веществ: оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и твердых частиц (PM). Уровень оксидов азота (NO<sub>x</sub>) сокращается на 80 %, выброс твердых частиц (PM) – на 50 %. Последний показатель является более строгим и важным, так как в расчёт идут не только вес, но и количество частиц. Чтобы соответствовать этим требованиям, необходим сажевый фильтр дизельного двигателя (DPF), предотвращающий попадание в атмосферу даже самых мелких частиц. Отличительные особенности Евро-6 по сравнению с предыдущими Евро-5:

- ужесточение требований по содержанию загрязняющих веществ в выхлопных газах в 2-5 раз по сравнению с предыдущими требованиями;

– количество выбросов твёрдых частиц, представляющих собой сажу, сокращается до 0,005 г/км;

– измерение не только величины поглощения светового потока выхлопными газами, а подсчёт количества частиц сажи;

– вместо использования либо SCR- системы, либо EGR-системы, будет совместное использование обеих систем;

– применение систем двухступенчатого промежуточного охлаждения наддувочного воздуха в сочетании с системой EGR.

Указанные значения представляют собой допустимый максимум, т.е. полученное в ходе испытания значение должно быть не более установленных нормированных значений. Средства измерения, оборудование и методики, используемые при проведении испытаний на соответствие экологическим классам Евро-5 и Евро-6 не имеют существенных отличий.

Применяемые методики испытаний [2]:

– испытание отработавших газов на токсичность;

– испытание отработавших газов на дымность.

В первой методике под токсичностью понимают содержание в отработавших газах таких веществ, как окись углерода (CO), углеводород (HC), оксид азота (NO<sub>2</sub>) и твёрдые частицы. Для этого используют барометр-анероид БАММ-1 и прибор АЛМЕМО 5590 с датчиками давления (разрежения), температуры и относительной

влажности. В методике по испытанию отработавших газов на дымность – под дымностью отработавших газов понимают показатель, характеризующий степень поглощения светового потока, просвечивающего отработавшие газы дизеля. Это является наиболее комплексным показателем, характеризующим токсичность отработавших газов двигателя. Испытания проходят следующим образом. Транспортное средство комплектуется необходимым оборудованием и испытывается на дороге. Для определения выбросов газообразных компонентов, твёрдых частиц и дыма применяются три испытательных цикла [1], [2]:

– ESC, состоящий из 13 режимов устойчивого движения;

– ELR, состоящий из переходных режимов нагрузки при различных оборотах двигателя;

– ETC, состоящий из посекундной последовательности серии переходных режимов.

В ходе серии рабочих режимов прогретого двигателя количество выбросов выхлопных газов определяется непрерывно путем взятия проб из первичных выхлопных газов. Испытательный цикл состоит из ряда режимов скорости и мощности, которые охватывают рабочий диапазон работы дизельного двигателя.

#### Литература

1. Регламент 459/2012/EU, Правила № 24-03 ЕЭК ООН.
2. СТБ 2169-2011.2, СТБ 2170-2011.

УДК 621.179.14

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РЕГУЛИРОВКИ СРЕДСТВ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ПОДГОТОВКЕ К ПОВЕРКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Эффективность использования средств неразрушающего контроля в промышленности в значительной мере определяется стабильностью их метрологических характеристик. Ряд преобразователей (рис. 1) средств импульсного магнитного контроля механических свойств ферромагнитных изделий [1, 2] содержат намагничивающий соленоид без сердечника, внутри которого симметрично расположен феррозонд-градиентометр, выходной сигнал которого после намагничивания при наличии корреляционной связи между магнитными и механическими свойствами испытуемых изделий, служит результирующим параметром контроля.

Для надёжного использования средств импульсного магнитного контроля важное значение при их изготовлении имеет выбор оптимальной

методики регулировки, в рамках их метрологического обеспечения [3, 4].

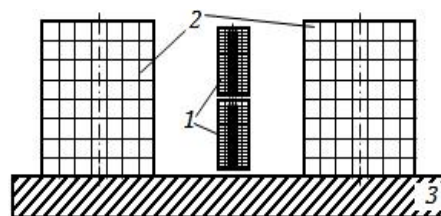
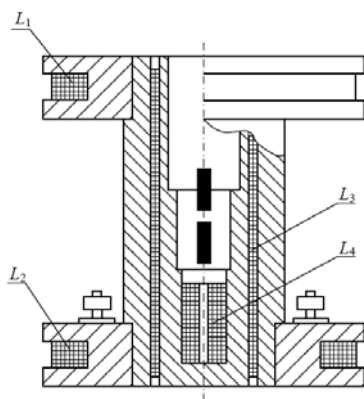


Рисунок 1 – Схематическое изображение центрального сечения измерительных полузондов (1) градиентометра относительно обмотки намагничивающей катушки (2) и образца (3)

Поскольку изготовление стандартных образцов в данном случае сложно и дорого, в основу метрологического обеспечения и поверки этих

средств [5-7] положен принцип физического моделирования магнитного поля контролируемого объекта с использованием мер градиента магнитного поля [3, 4]. При этом операции поверки блока намагничивания и блока измерения производятся раздельно с помощью меры градиента магнитного поля (рисунок 2). Мера создаёт в своей рабочей области однородный градиент магнитного поля, регулируемый по величине в требуемых пределах за счёт секций типа кольцевых катушек Максвелла. Расположенный внутри кольцевых обмоток соленоид позволяет создать суммарное магнитное поле, приближающееся по величине к реальному над поверхностью испытуемого ферромагнетика. Кроме того, использование соленоида в комбинации с электронным осциллографом и интегрирующим элементом позволяет произвести оценку величины амплитуды намагничивающего импульса.



$L_1, L_2$  – градиентные кольца Максвелла,  $L_3$  – соленоид,  
 $L_4$  – дополнительный соленоид

Рисунок 2 – Мера градиента магнитного поля МПП-2

С другой стороны, при настройке и регулировке необходимо обеспечить не только одинаковые характеристики приборов в мере, но и минимальную разницу показаний на металле (а в дальнейшем на контролируемом изделии). При такой дополнительной оценке можно использовать как стандартные, так и нестандартные образцы для периодической, ежедневной, контрольной и т.п. проверок надежности результатов приборов неразрушающего контроля.

Каждый из подходов при настройке приборов (в мере или по образцам) имеет не только преимущества, но и недостатки. Так при поверке по образцам наилучшим образом имитируется реальный процесс контроля изделий на производстве, но при этом надежность контроля проверяется только в нескольких точках, поскольку большой набор образцов (которые необходимо проверять через один год) существенно увеличивает стоимость процедуры аттестации приборов. Кроме того, проверяется только конечный результат работы прибора, который может быть получен несколькими способами, поскольку гра-

диент остаточной намагниченности зависит от амплитуды, длительности и формы импульса намагничивания, а также от размеров полузондов феррозонда, их взаимного расположения, ферромагнитных свойств сердечника и так далее. Использование меры, например, типа МПП-2, обеспечивает простыми средствами не только контроль за работой прибора во всех точках его рабочего диапазона по величине градиента остаточного магнитного поля, но и величины амплитуды импульса, его форму, длительность и так далее.

Необходимо также отметить, что меры подвержены меньшим изменениям с течением времени, поэтому межповерочный интервал у них может быть заметно больше, чем у стандартных образцов, и проведение их аттестации заметно проще. Стандартные образцы подвержены также не только старению со временем, но и получают механические повреждения в процессе использования, что может быть не столь заметно. Однако, это приводит к дополнительной неоднородности металла вещества по объему, что обнаружить, а тем более устранить затруднительно. Кроме того, даже в процессе аттестации вещества стандартных образцов в соответствии с теми фундаментальными физическими принципами, которые обычно используются при измерении магнитных свойств металла, не обеспечивается желаемая высокая точность измерений.

Поэтому в данной работе рассматривается совершенствование методики регулировки без использования стандартных образцов и касается, в основном, операций, связанных с преобразователями рассматриваемых приборов с использованием мер типа МПП как обязательного объекта поверки, и нестандартных образцов как дополнительного.

Так, при окончательной сборке преобразователя феррозонд на первой стадии закрепляется с возможностью его перемещения внутри намагничивающей катушки. Производится проверка «0» при отсутствии градиента поля в мере. Далее за счёт регулировки усилителя выходного сигнала прибора устанавливается в соответствии с требованиями методики поверки необходимая величина коэффициента преобразования выходного сигнала в мере.

После этого проверяется и корректируется одинаковость величины выходного сигнала каждого из всей партии приборов на нестандартных образцах по свойствам близких к верхнему и нижнему пределам разбраковки изделий, на которых предполагается проведение неразрушающего контроля. Это достигается за счёт регулировки смещения феррозонда внутри намагничивающей катушки ближе или дальше от поверхности контролируемого металла (ориентируясь на показания прибора и преобразователя, ранее выбранного в качестве контрольно-



го). Затем феррозонд жёстко закрепляется. Ранее для этой цели использовался дополнительный соленоид  $L_4$ . Окончательная коррекция требуемых показаний приборов на вышеуказанных образцах осуществляется регулировкой амплитуды в рамках требований методики поверки к намагничивающим импульсам и за счёт дополнительного сопротивления в разрядной цепи.

Таким образом, без использования стандартных образцов обеспечивается лучшая идентичность и стабильность показаний приборов и, в конечном счете, надежность и достоверность результатов неразрушающего контроля, что является важным условием качества выпускаемой продукции. Разумное сочетание и развитие различных подходов (меры и нестандартных образцов), используемых при изготовлении приборов и установок неразрушающего контроля позволяет при контроле с использованием корреляционных связей получить большую воспроизводимость результатов измерений.

#### Литература

1. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Минск: Наука и техника. – 1980. – 184 с.
2. Матюк, В. Импульсный магнитный контроль изделий черной металлургии и машино-

строения / В. Матюк, М. Мельгуй, В. Пиунов // В кн.: *Predikce mechanických vlastnosti materiálů na základě strukturálních charakteristik (Sborník přednášek ze VII. vědecké konference)* – Ski Hotel. – Nové Město na Moravě. – 2001. – С. 311–323.

3. Мельгуй, М.А. Метрологическое обеспечение приборов импульсного магнитного контроля ферромагнитных материалов / М.А. Мельгуй, В.Ф. Матюк, В.Д. Пиунов // *Весті АН БССР. – Сер. фіз.-тэхн. Навук.* – 1987. – № 2. – С. 107–112.

4. Мельгуй, М.А. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля / М.А. Мельгуй, В.Д. Пиунов // В кн.: *Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции* – М.: МДНТП. – 1977. – С. 130–135.

5. Мельгуй, М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4 / М.А. Мельгуй и др. // *Дефектоскопия* – 1979. – № 3. – С. 29–32.

6. Матюк, В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В.Ф. Матюк и др. // *Дефектоскопия*. – 2003. – № 3. – С. 47–53.

7. Матюк, В.Ф. Приборы магнитной дефектоскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания / В.Ф. Матюк // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2012. – № 4. – С. 20–45.

УДК 615.849.11

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МАКСИМИЗАЦИИ ЛЕЧЕБНОГО ЭФФЕКТА МИКРОВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ТЕРАПИИ Плакса Д.В., Терешенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

В связи с индивидуальным характером чувствительности организма человека к физиотерапевтическому воздействию, для того, чтобы получить максимальный эффект от лечения и контролировать безопасность пациента, необходимо выбрать оптимальные параметры воздействия терапевтической аппаратуры, проводить их контроль, а при необходимости – корректировать их на протяжении процедуры.

Перед физиотерапевтической процедурой для аппаратов микроволновой резонансной терапии (МРТ) устанавливаются терапевтическую частоту, время процедуры, определяют зону воздействия, количество сеансов, оптимальную терапевтическую дозу и частоту модуляции.

Терапевтическая частота выбирается из ряда рекомендованных для наиболее распространенных заболеваний или патологий, но при этом может меняться и уточняться индивидуально, в процессе процедуры. Зону воздействия выбирают после определения диагноза с помощью электрических поисковых аппаратов. Процедура должна длиться от 10-15 до 40-50 мин, но с учетом того, что одна

зона не должна облучаться больше 10-15 мин. Количество процедур в среднем равно от 7 до 14. Значение оптимальной терапевтической дозы определяется из соотношения [1]:

$$D = kPt\alpha / (\gamma\eta S), \quad (1)$$

где  $D$  – оптимальная терапевтическая доза,  $k$  – коэффициент поглощения среды распространения излучения,  $P$  – мощность падающего излучения,  $t$  – время излучения,  $\alpha$  – коэффициент модуляции,  $\gamma$  – индивидуальная биологическая чувствительность,  $\eta$  – степень поражения больного участка,  $S$  – площадь зоны воздействия. Частота модуляции определяется согласно частотам ритмических процессов, которые происходят в организме человека.

Но эта формула, в неполной мере характеризует процесс действия КВЧ-излучения на биологическую ткань. Не учтены изменения температурных градиентов ни самой биологической ткани  $\Delta T_b$ , ни окружающей среды  $\Delta T_c$ . Таким образом более достоверная формула имеет вид:

$$D = kPt\alpha K_{\Delta} / (\gamma\eta S) \quad (2)$$

где  $K_d = \Delta T_b / \Delta T_c$  – коэффициент, учитывающий изменения температурных градиентов биологической ткани  $\Delta T_b$ , и окружающей среды  $\Delta T_c$ .

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что результаты облучения зависят от вида биологической ткани и параметров окружающей среды. Это означает, что корректировка дозы излучения, учитывая изменения температурных градиентов биологической ткани  $\Delta T_b$ , и окружающей среды  $\Delta T_c$ , оправдана для оценки запланированных доз и обеспечения ожидаемого лечебного эффекта.

В медицинской практике, чаще, используют не значение оптимальной терапевтической дозы, а значение интенсивности СВЧ-излучения, определяемая по формуле Рэлея-Джинса:

$$J_\omega = \frac{8\pi f^2}{c^2} \beta k T = \frac{8\pi}{\lambda^2} \beta k T, \quad (3)$$

где  $f$  – частота колебаний,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – термодинамическая температура тела,  $c$  – скорость света,  $\beta$  – коэффициент излучающей способности тела,  $\lambda$  – длина волны.

Так как на показания прибора для измерения температуры биологического образца, значительным образом влияет температура окружающей среды, эти вариации необходимо учесть при выполнении физиотерапевтических процедур или моделировании процесса изменений интенсивности крайне высокочастотного (КВЧ) излучения. Таким образом, с учетом температур  $T_{\text{среды}}$  окружающей среды, формула определения интенсивности принимает вид:

$$J_\omega = \frac{8\pi f^2}{c^2} \beta k T K_{T_{\text{среды}}}, \quad (4)$$

где  $K_{T_{\text{среды}}} = T_{\text{среды}} / T$  – коэффициент, учитывающий изменение температур  $T_{\text{среды}}$  окружающей среды.

По полученным выражениями (2, 4) произведем математическое моделирование и практические измерения влияния КВЧ-излучения на различные типы биологической ткани в зависимости от частот и градиентов температур.

При сравнении полученных результатов с учетом температурного градиента, можно утверждать, что получена более достоверная оценка лечебного эффекта, из-за более точного и достоверного значения оптимальных терапевтических доз и интенсивности СВЧ-излучения, с учетом параметров окружающей среды и действительных значений воздействия. Это обеспечивает точное выполнение Регламента и Протокола проведения физиотерапевтической процедуры СВЧ и КВЧ-излучений, в допустимых пределах безопасности пациента.

Необходимость оценки теплового воздействия МРТ на биологическую ткань следует из того, что данный вид лечения относится к направлению электротерапии и не обходимо обеспечить безопасность проведения процедуры

(предупредить возможность перегрева тканей) и зафиксировать их изменения для оценки эффективности терапии.

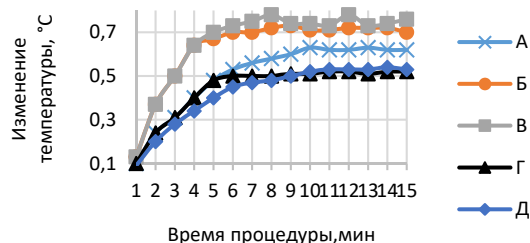
Проведен ряд экспериментов по оценке влияния КВЧ-излучения с учетом возрастных изменений кожного покрова пациентов и полового распределения с изменениями температуры ткани в зависимости от продолжительности процедуры. Исследования проводились в 5-ти целевых группах, разделенных по возрасту, полу и типу биологической ткани: женщины в возрасте до 30 лет; женщины в возрасте от 30 лет; мужчины в возрасте до 25 лет; Мужчины в возрасте от 25 лет; неживая ткань животных.

Зоной воздействия для исследования людей была избрана ладонь руки, а для животных биологических тканей – кожа, жировая и мышечная ткани отдельно.

В исследованиях процессов терапии КВЧ-излучения использован аппарат «Порог-3», который имеет рабочий диапазон частот 54-78 ГГц и мощность излучения 0,1-1 нВт. Это портативный аппарат для КВЧ-терапии, который состоит из генератора СВЧ-излучения и блока питания.

В качестве устройства для измерения температуры излучения было выбрано матричный тепловизор Mobil 3M.

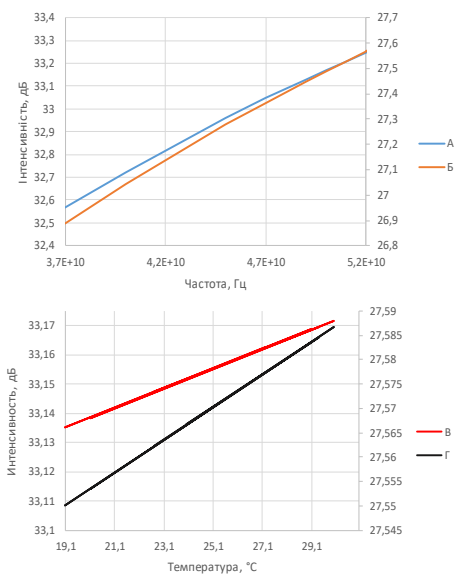
Результаты экспериментов использованы в дальнейших математических расчетах по формулам (1-4) и сравнении с теоретическими значениями при моделировании. Полученные результаты эксперимента приведены в виде графиков зависимости изменения температуры от длительности терапии по каждой из целевых групп (рис. 1).



А – мужчины до 25 лет, Б – мужчины от 25 лет, В – женщины до 30 лет, Г – женщины от 30 лет, Д – биологическая ткань животного

Рисунок 1 – Средние значения результатов изменения температур по каждой из целевых групп

Как видно из приведенных графиков, сначала происходит рост температуры исследуемой ткани с увеличением времени терапии, а начиная с некоторого момента времени (5-7 минут) температура практически не меняется. Для различных целевых групп форма графиков аналогична, но различаются максимальные амплитуды изменения температуры, и время, начиная с которого она переходит в состояние стабилизации. Результаты математического моделирования по формулам (3, 4) показано в виде графиков на рис. 2.



А – частоты (без учета температуры среды);  
 Б – частоты (с учетом температуры среды);  
 В – температуры (без учета температуры среды);  
 Г – температуры (с учетом)

Рисунок 2 – Графики диапазонов изменения вычисленных значений интенсивности в зависимости от измеренных значений

УДК 629.1.05:622.684

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА

Почужевский О.Д., Почужевская Ю.Л., Веснин А.В.

Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина

Оптимизация параметров и согласования режимов работы узлов и агрегатов является одним из наиболее актуальных и малозатратных путей улучшения эксплуатационных показателей большегрузных карьерных автосамосвалов.

При расчете тягово-скоростных характеристик карьерного автосамосвала, в расчетах используется коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха, значение которого эмпирически еще не было определено для данных большегрузных машин – в связи с их габаритно-весовыми параметрами и спецификой условий эксплуатации. При этом выбранное значение коэффициента, существенно влияет на погрешность расчетных величин, и как следствие на выбор оптимальных параметров и режимов работы узлов и агрегатов [1, 2].

Целью методики является уменьшение погрешности расчетов тягово-скоростных характеристик карьерного автосамосвала.

С помощью разработанного метода, коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха карьерного автосамосвала, определяется эмпирическим способом.

Методика проведения эксперимента разработана на основе действующих нормативных документов [3-5].

Так как большие значения температур биологической ткани были измерены в теплое время года, то есть в условиях больших температур окружающей среды, при этом согласно графиков выросла и интенсивность, рассчитанная как по классической формуле (3), так и полученной в процессе исследований (4). Полученные результаты подтвердили целесообразность поправки на влияние окружающей среды. Практически линейно-экспоненциальный характер изменения интенсивности позволяет эффективно контролировать данный параметр путем выбора среды (помещения) проведения терапии с соответствующим оптимальным температурным режимом.

### Литература

1. Плакса Д.В., Терещенко Н.Ф. Оценка теплового воздействия микроволновой резонансной терапии на биологическую ткань // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студ. 18-20 апреля 2018 г. / Минск, БНТУ, 2018, – 497 с., С. 78.

Следует отметить, что методика проведения экспериментальных испытаний методом «разгон-выбег» внедорожных транспортных средств, которыми согласно ГОСТ 30537-97 является карьерные автосамосвалы, предполагается проводить согласно ГОСТ 22576-90.

Рассмотрим условия испытаний, а именно:

#### Требования к объекту испытаний

Карьерный автосамосвал должен быть исправным, укомплектованным, заправленным горюче-смазочными материалами в соответствии с нормативно-технической документацией. Двигатель, трансмиссия и шины должны пройти надлежащую обкатку в соответствии с инструкцией предприятия-изготовителя и иметь пробег, включая обкатку, не менее 3000 км.

Износ шин карьерного автосамосвала не должно превышать 50 %. Шины не должны иметь повреждений.

Давление в шинах должно соответствовать требованиям предприятия-изготовителя.

Давление измеряется и регулируется на «холодных» шинах. В процессе испытаний карьерного автосамосвала, регулирования давления не допускается.

Окна и вентиляционные люки при проведении испытаний должны быть закрыты.

Оборудование для подогрева воздуха системы питания, не имеет автоматического управления, должно быть установлено в положении «Лето». Система отопления кабины и кондиционирования воздуха должны быть выключены.

При испытаниях используется снаряженная масса большегрузного карьерного автосамосвала.

Распределение массы по осям (колесам) должен соответствовать требованиям технической документации.

#### *Измерительный участок*

Измерения проводят на прямом участке дороги с твердым, гладким, чистым, сухим покрытием.

Характеристика прямого участка дороги должна быть следующей: продольный уклон - не больше 0,5% на участке длиной не более 50 м; поперечный уклон - не больше 3 %; длина измерительного участка не должна быть менее 2000 м.

Подъездные дорожные участки должны иметь аналогичное покрытие и длину, достаточную для разгона и стабилизации скорости карьерного самосвала.

#### *Средства измерений*

Средства измерений должны быть компактными, простыми в установке и использовании, виброустойчивыми и обеспечивать необходимую точность измерений при температуре воздуха  $\pm 40$  °С на всех режимах движения карьерного автосамосвала; установка их на карьерный автосамосвал не должна влиять на сопротивление движению.

Погрешность средств измерений не должна превышать значений, указанных в табл. 1.

Таблица 1 – Допустимая погрешность средств измерений

| № п/п | Наименование                               | Погрешность не более |
|-------|--------------------------------------------|----------------------|
| 1     | Время                                      | 0,1 с                |
| 2     | Скорость движения карьерного автосамосвала | 1 %                  |
| 3     | Скорость воздуха                           | 0,5 м/с              |
| 4     | Температура воздуха                        | 1 °С                 |
| 5     | Атмосферное давление                       | 3,0 гПа              |
| 6     | Относительная влажность                    | 7 %                  |
| 7     | Масса карьерного автосамосвала             | 0,3 %                |

#### *Атмосферные условия*

При дорожных испытаниях карьерного автосамосвала, должны соблюдаться следующие требования: средняя скорость ветра, измеренная на высоте 1 м над поверхностью дороги, не более 3 м/с (при порывах до 5 м/с); плотность воздуха не должна отличаться более чем на 7,5 % от плотности воздуха, определенной при нормальных атмосферных условиях (атмосферное давление  $P_0 = 1000$  гПа (750 мм рт.ст.), темпера-

тура воздуха  $T_0 = 293$  К (20 °С) плотность воздуха при испытаниях ( $d_1$ ), кг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле:

$$d_1 = d_0 * ((P_1/P_0) * (P_1/P_0)) \quad (1)$$

где  $d_0$  – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, равная 1,189;  $P_1$  – атмосферное давление при проведении испытаний, гПа;  $T_1$  – температура при проведении испытаний, К.

При этом не должна отличаться более чем на 7,5 % выше. Температура воздуха не должна быть ниже 276 К (3 °С), атмосферное давление ниже 910 гПа и относительная влажность воздуха выше 95 %.

Для проведения исследований, разработано метод испытаний в котором перед проведением исследований, тепловой режим агрегатов и узлов карьерного автосамосвала необходимо довести до нормального состояния, устанавливается пробегом не менее 50 км при скорости движения не ниже 10 км/ч. При вынужденных простоях карьерного автосамосвала в процессе испытаний и снижении температуры агрегатов и узлов необходимо восстановить их тепловое состояние дополнительным пробегом.

Определение аэродинамического коэффициента происходит по методу «двукратного выбега». Движение начинают с передачи, используемой при трогании с места, после достижения начальной скорости первого выбега – 35 км/ч, выключают передачу и карьерный автосамосвал движется к конечной скорости первого выбега – 25 км/ч, при этом фиксируется время  $t$ , которое было затраченное на это уменьшение скорости. При втором выбега проводится измерения времени падения скорости от 15 до 5 км/ч.

Минимальное число измерений  $n$  для определения  $t$ , затраченного на падение скорости должно быть не менее 4-х, для каждого из выбегов.

Измерения могут проводиться с использованием бортового компьютера, системы навигации GPS или других имеющихся средств, соответствующих вышеизложенным требованиям.

Следует отметить, что определение погрешности измерений проводятся согласно методике обработки результатов испытаний. Параметры движения (время, скорость) следует регистрировать с помощью измерительной аппаратуры.

Результаты измерений заносятся в сводную таблицу.

#### *Формирование методики обработки результатов испытаний*

Для проведения расчетов необходимо собрать входящие данные: лобовая площадь карьерного автосамосвала, м<sup>2</sup>; масса карьерного автосамосвала, кг; средняя скорость первого выбега, км/ч; средняя скорость второго выбега, км/ч; интервал времени первого выбега, с; интервал времени

второго выбега, с; коэффициент Стьюдента; доверительная вероятность значений, %.

При проведении расчетов определяется: Среднее значение интервала времени для каждого выбега, с; Абсолютная погрешность среднего значения интервала времени для каждого выбега, с; Абсолютная погрешность среднего значения интервала времени для каждого выбега, с; Средняя скорость выбега, км/ч; Среднее замедление выбега, (км/ч)/с; Коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха; Абсолютная погрешность среднего значения аэродинамического сопротивления воздуха, %.

Следует отметить, что относительная погрешность измерений не должна превышать 3 %, если после 10 измерений погрешность превышает 3 %, то испытания данного карьерного автосамосвала прекращаются.

Таким образом сформированная методика позволит получить эмпирические, более точные, значения коэффициента аэродинамического сопротивления воздуха карьерных автосамосвалов.

Последующие исследования будут направлены на формирование методики исследования сопротивления качения крупногабаритных шин и положение центра масс карьерных автосамосвалов.

#### Литература

1. Автомобильный справочник: Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
2. Почужевський О.Д. Обґрунтування раціональних параметрів системи «двигун-трансмсія» кар'єрних самоскидів» [Текст] : дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : 05.05.06 / Почужевський О.Д. / ДВНЗ «Криворізький національний університет. – Кривий Ріг., 2013. – 200 стор.
3. ГОСТ 22576-90 Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний.
4. ГОСТ 30537-97 Самосвалы карьерные. Общие технические условия.
5. ГОСТ 31302-2005 Средства транспортные внедорожные большегрузные. Общие технические условия.

УДК 533.69.048.3.015.32(045)(476)

### НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА Манкевич О.Д., Ровнейко И.В.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

Эталон единицы скорости воздушного потока создавался в соответствии с заданием 2.3 «Исследовать установку аэродинамическую эталонную измерительную и создать на ее основе Национальный эталон единицы скорости воздушного потока» научно-технической программы «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» подпрограммы «Эталоны Беларуси» и договором № 5/2016 от 15.06.2016 между Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь и Республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный институт метрологии». Эталон создан и исследован в период со 2 кв. 2016г. по 4 кв. 2017г.

Основными элементами созданного эталона являются:

1. Установка эталонная аэродинамическая измерительная, основные функциональные элементы которой рассмотрены в [1]. Принцип действия данной установки заключается в следующем: для создания воздушного потока служит вентилятор, выходной патрубок которого соединен с воздуховодами. В конструкции воздухопроводов применены аэродинамические углы, обеспечивающие минимизацию трения во время прохождения воздуха. Из воздухопроводов воздух попадает в подготовительные камеры стабилизации потока. При этом в одной из камер расположен содовый струевыпрямитель, который обеспечивает достижение посто-

янного потока, а также снижает чувствительность установки к внешним влияниям. В подготовительной камере расположен дополнительный струевыпрямитель в виде сита. Он служит для обеспечения однородности линий воздушного потока, а также гашения оставшихся возмущений потока. После подготовки воздух поступает на выход измерительного сопла, предназначенного для передачи воздуха с заданной скоростью. Измерительное сопло в виде конфузора приводит к ускорению потока воздуха, поступающего из подготовительной камеры. Диффузоры служат для замедления скорости потока путем увеличения диаметра трубопровода. В состав установки входит регулятор давления, представляющий собой ряд отверстий, расположенных по диаметру трубопровода, входное сопло. Внешний вид аэродинамической установки показан на рисунке 1.

2. Трубка ПИТО в комплекте с преобразователями дифференциального давления и системой вычисления и управления потоком и термоэлектрический анемометр типа 8455-300-1 с системой вычисления и управления потоком. Данные средства измерений являются рабочими эталонами, при помощи которых осуществляется метрологический контроль средств измерений скорости воздушного потока. Внешний вид трубки Пито и термоэлектрического анемометра приведены на рисунке 2, а системы вычисления и управления потоком – на рисунке 3.



Рисунок 1 – Аэродинамическая установка



Рисунок 2 – Трубка Пито и термоэлектрический анемометр



Рисунок 3 – Система вычисления и управления потоком

3. Преобразователи абсолютного давления, температуры и влажности измеряемой среды.

4. Система позиционирования 3-х координатная.

5. Аэрозольный генератор AGF.

6. Компрессор.

7. Персональный компьютер.

6. LDA система.

LDA система является высоточным прибором для измерения скорости потока и основывается на принципе лазерного доплеровского измерения скорости. Главным условием для выполнения измерений является оптическая доступность потока среды. Два лазерных луча пересекают друг друга, создавая зону с перекрытием, который служит измерительным объемом. В данном измерительном объеме образуется картина расположения интерференционных полос, расстояние  $\Delta X$  между которыми определяется длиной волны  $\lambda$  лазерного излучения и углом  $\Theta$  между двумя лазерными лучами

$$\Delta X = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad (1)$$

Микроскопические частицы, присутствующие в потоке, рассеивают лазерный свет при прохождении через измерительный объем в об-

ратном направлении на частоте, пропорциональной скорости потока. Этот обратно рассеянный свет с помощью фотодетектора преобразуется в сигнал напряжения, который затем фильтруется и усиливается, частота доплеровского смещения определяется с помощью Быстрого Преобразования Фурье.

В LDA системе в качестве источника света используется поляризованные, одномодовые лазеры. Лучи имеют высокий фактор качества пучка. Основными компонентами LDA системы являются зонд и контроллер. Внешний вид LDA системы представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид LDA

Исследования метрологических характеристик установки аэродинамической эталонной измерительной осуществлялись на протяжении 2015 – 2017 годов. В 2015 – 2016 годах при помощи рабочих эталонов проводились исследования аэродинамической установки в части погрешности воспроизведения скорости воздушного потока и стабильности результатов измерений.

В 2017 году были проведены калибровки лазерного анемометра:

– в РТВ, Германия, с целью определения расстояния между интерференционными полосами,

– в ПЛА, Германия, с целью определения точностных характеристик при измерении доплеровской частоты.

В 2017 году при помощи лазерного анемометра проводились исследования метрологических характеристик аэродинамической установки в комплекте с рабочими эталонами (трубкой Пито и термоэлектрическим анемометром) при воспроизведении и передаче единицы скорости воздушного потока.

Абсолютная погрешность измерения скорости воздушного потока  $\Delta$ , м/с, находится в пределах:

– при использовании анемометра термоэлектрического в комплекте с системой вычисления потока;

– в диапазоне от 0,1 до 0,5 м/с:  
 $\pm(0,0004 + 0,001 \cdot V)$ ;

– в диапазоне свыше 0,5 до 2,0 м/с:  
 $\pm(0,0001 + 0,004 \cdot V)$ ;

– при использовании трубки напорной Пито в комплекте с преобразователями дифференциального давления и с системой вычисления потока;

– в диапазоне свыше 2 до 50 м/с:  
 $\pm(0,009 + 0,009 \cdot V)$ .

В ходе проведенных исследований установлено, что подтверждается стабильность поддержания скорости воздушного потока по результатам поученным в 2015, 2016 и 2017 годах.

Данный комплект оборудования для измерения скорости воздушного потока утвержден в качестве Национального эталона единицы скорости воздушного потока Постановлением Государства Республики Беларусь № 3 от 17.01.2018.

В настоящее время при помощи созданного Национального эталона выполняются работы по метрологическому контролю средств измерений скорости воздушного потока различных типов и принципов действия (testo, ТКА-ПКМ,

ИСП-МГ4, АСЦ-3, МЭС-200А, ТТМ-2, трубки напорные ПИТО и НИИОГАЗ).

#### Литература

1. О.Д. Манкевич, И.В. Ровнейко «Создание установки аэродинамической эталонной измерительной», – Сборник научных трудов БелГИМ. Выпуск 14, – Минск, БелГИМ, 2016-Вып. 14. – 156 с.

2. WK 845050-G Wind Tunnel. Manual. V1.00

3. ГОСТ 8.542-86 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока.

УДК 535.3

## THE MAIN PROVISIONS OF THE HIGH-RESOLUTION COLORIMETRY

Saukova Y.

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

According to [1] colorimetry is a measurement of colour performed in accordance with an accepted system of conventions (international agreements). Since color is defined as sensation [1] and a measurable value [2] it can be evaluated qualitatively (subjective methods) and measured quantitatively (objective methods). Subjective methods are based on the equalization of colours before the disappearance of their visual differences with the help of visual additive and subtractive colorimeters, color scales and atlases. N.D. Nyuberg proposed to divide the process of research and interpretation of color effects on the organs of vision into three levels [3]:

– physical (optical phenomena arising from the interaction of light radiation with objects in different environments and conditions of observation);

– physiological (effects of optical radiation on the visual analyzer, including light and color sensations);

– psychological (psychological sensations caused by the influence of radiation with certain physical characteristics, including the environment).

Objective methods involve the use of measuring instruments to obtain spectral distribution functions of primary and secondary emitters and on their basis to determine the coordinates of color and chromaticity [2, 4]. Basic colorimetry is based on standardized models of observation conditions and is used in the control of products in medicine, chemical, paint industry, printing. The highest colorimetry according to Vyshetsky «includes methods for assessing the perception of color stimulus presented to the observer in a complex environment that we observe in everyday life» [5] that is, in real conditions of observation. The problem of correct colour reproduction and colour perception becomes more complicated when reproducing a color image (reproduction, color photography, the image on the screen of the TV, computer) because it increases the amount of information and the accurateness of color people can judge, mainly relying on their

memory (provided that in this moment he didn't see the original). Therefore, in this case it is necessary to ensure the process of hardware independent color reproduction [6]. The technologies of color information transmission of images in telecommunication systems are based on the use of the highest colorimetry principles. Taking into account the characteristics of visual perception and observation conditions including colorimetric parameters of the environment is an important trend for further improvement of these systems. D. Fairchild introduced the concept of «absolute» and «relative» colorimetry in terms of capabilities of the color reproduction technical means. If the output device has a wider spectrum than the original profile, that is, all colors at the input can be displayed at the output visualization using absolute colorimetry is used and colors outside the boundaries of the reproduced color will be transferred to the edge of the color spectrum of the output device while preserving the «white point» [6]. Relative colorimetry takes place in color transformations of colour rendering systems allowing to shift colours with the movement of the «white point» to a new position taking into account the limitations of the technical devices colour gamut [6].

The prerequisites for the development of high-resolution colorimetry are colour television and digital photography, integrated control of the light environment, information and advertising industry as well as the development and cheapening of digital technology. Under the High-Resolution Colorimetry, the author implies a methodology of multiparameter measurements and an interdisciplinary field of research covering methods and means of measurement, control and testing of self-luminous and non-self-luminous objects at all stages of their life cycle, based on the use of technologies of digital registration of objects with high spatial resolution and processing of their images, allowing a given level of

reliability to provide reliable results of measurement, control and testing. The High-resolution Colorimetry is based on the following provisions.

1. According to the physical implementation of the digital image is a non-point primary emitter at the macro level and an ordered set of elements (pixels) at the micro level. It is the final link of the information channel including the recording device (digital camera, scanner), data conversion channel and display device (display, video terminal). Any extended surfaces and each of the elements of the information channel (scanner, camera, display, software) can be the objects of research based on the analysis of digital images. The validation model of the information-measuring channel developed by the author is based on the fact that the digital image is the result of convolution of the functional spaces of the properties of these elements and the information model of any of them provided that all other elements are validated. Each element of the information-measuring channel can also have a large number of implementations on the basis of "the investigated element": 1) illuminator when measuring color; 2) illuminated surface; 3) digital camera when it is calibrated; 4) software for testing measuring systems; 5) display device when it is calibrated. Definition uncertainty of the colours in the software and hardware environments there is a parameter associated with the measurement result which characterizes the least in a multidimensional functional space area of dispersion of values is due to the limited detail in the definition of the color as subjective feelings and affine vector quantities measured by averaging the signals of the digital image in the context of the interaction of factors, «space-time», the principle of statistical redundancy, quantization effects and metamerism in the discrete vision systems with an unlimited number of input and output variables.

2. Principles and methods of measurement of brightness and color of self-luminous and non-self-luminous extended objects are based on optical-electronic transformations in the information-measuring channel at digital registration of the object and certified reference samples by the matrix photodetector and processing of the received digital images for construction of calibration dependences of intensity of color channels on brightness of reference samples and time of exposure and determination of brightness and color of the object at the control point with the expanded uncertainty not exceeding 10%. The intensity and chromaticity in the coordinates of the standard color spaces for each (red, blue, and green) color channel are determined by the formula:

$$L = K\eta \left[ (N - N_0) \frac{(L_{02}k_2 - L_{01}k_1)}{N_{02} - N_{01}} + L_1k_1 \right], \quad (1)$$

where  $K$  – scaling factor;

$\eta$  – coefficient taking into account the registration parameters (aperture and the transmittance of the lens);

$N$  – the output signal of the CCD matrix corresponding to the brightness of the reference point on the image of the object for this channel;

$L_{01}, L_{02}$  – the reference brightness in a given color channel,  $\text{cd/m}^2$ ;

$k_1, k_2$  – coefficients which depend on the distribution of the reference radiation;

$N_{01}, N_{02}$  – the output signals of the CCD matrix correspond to the brightness of the reference image on the object in this colour channel.

3. The principle of constructing a conditional multi-dimensional scale for colour measurements is to create a set of certified reference samples-non-point emitters belonging to a certain sector of the color palette forming a digital registration with a step-by-step increasing exposure time vectors in the color space XYZ, originating from the zero reference point of space and intersecting the plane of the color locus of the color chart forming on it a geometric place of color points, allowing to ensure the condition of uniformity of measurements.

4. A method for expanding the dynamic range of colorimetric measurements based on registration with step-by-step increasing exposure time of the reference point of the object and certified reference samples by a matrix photodetector and processing of the obtained digital images, in which the calibration dependences of the intensity on the brightness of the reference samples and the exposure time for the three color channels are constructed and the coordinates of the control point color are determined by pairing the calibration dependencies corresponding to different digital images, which allows to measure the brightness and chromaticity in the range of 60 dB.

5. A method of the methodological uncertainty reducing in the colorimetric measurement hardware and software environments is based on a digital image processing in which the coordinates define the color of an area of the digital image in the RGB color space klassificered and identified their place, the circulation in the color space XYZ, build the calibration dependence of the intensity of the color channels of luminance and exposure time determine the chromaticity coordinates. This method allows to reduce the risks of the first and second kind errors in the control and to increase the resolution of color measurement by fixing the nominal quantization steps in the color channels of images.

6. A complex model of the results of multiparameter measurements in discrete systems with an unlimited number of input and output quantities based on the use of modular ascending and descending approaches in the construction of models of mathematical expectations of measurement results and models of their scattering (uncertainty and covariance), combining the components of uncertainty with entropy allowing to formalize the description of measurement results in software and hardware environments.

Regression analysis allowed to determine the optimal area of the image for research in pixel graphics



providing the lowest dispersion equal to 128 by 128 pixels or 0.068 % of the total number of pixels.

**References**

1. International Lighting Vocabulary) / Publication CIE 1.1.N17-(1970); 3th Edition. 280 p.  
 2. ISO/TK 452 «Safety of audio, video, electronic equipment, information technology and telecommunication equipment».

3. Nyuberg N.D. The theoretical basis of the color reproduction. – M.: «Soviet science» 1947. – 176 p.  
 4. GOST 13088-67 «Colorimetry. Terms, letter designations».  
 5. Gurevich M.M. Colour and its measurement. – Moscow : Publishing SA USSR, 1950. – 268 p.  
 6. Fairchild M.D. Models of color perception. 2nd Edition. // Rochester Institute of technology, Mansell colour science laboratory. 2006. – 439 p.

УДК 535.3

**QUANTITATIVE RESEARCHES IN THE VISION TECHNICAL SYSTEMS WITH UNLIMITED NUMBER OF ENTRANCE AND OUTPUT MAGNITUDES**

**Saukova Y., Alkhimovich M.**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Quantitative researches in the vision technical systems are based on processing of digital images at measurements and modeling of objects properties. In this regard a method of the correlation and regression analysis described in [1] is the convenient instrument of results displaying. The method allows to reveal significant factors of influence and to define interrelations between them (or their absence) [2]. The usage of 3D technologies gives the chance to display triads of magnitudes and to represent the results of multiple parameter researches as a vector columns and sets of covariation matrixes. The review of sources [1-4] has shown that for covariance assessment most often use coefficient of linear correlation of  $r_{x,y}$  and a correlation ratio  $\eta_{yx}^\epsilon$  (for nonlinear dependences) and also a method of the smallest squares and confidential intervals.

1. The Pearson coefficient of linear correlation expresses degree of narrowness of linear communication between two random variables and is calculated according to selective data on a formula:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}] \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

where  $x_i, y_i$  the values of variables  $x, y$  respectively,  $n$  – number of observations.

The coefficient of correlation can accept values from -1 to +1 and the direction of change of characteristics is reflected by the signs «+» or «-» before it. This coefficient shows communication «force» i. e. synchronism of change of two variables.

According to Fischer the statistical importance of Pearson correlation coefficients in a case of their normal distribution is checked on the basis of Student's t-distribution with the set of the probabilistic importance level  $\alpha$  and the known factors number in a model [3]. We find the value of t-criterion on a formula:

$$t_{calc} = r_{xy} \sqrt{\frac{n - k - 1}{1 - r_{xy}^2}}, \quad (2)$$

from here

$$r_{xy} = \frac{t_{calc}}{\sqrt{n - k - 1 + t_{calc}^2}}, \quad (3)$$

where  $k$  – number of factors in the model. It is necessary to compare the value of the criterion  $t_{calc}$  with the theoretical value  $t_{tab}$  specified in statistical tables. If  $t_{calc} > t_{tab}$ , the correlation coefficient is considered to be statistically significant, and this coefficient is insignificant when  $t_{calc} \leq t_{tab}$ . If the probability distribution is not normal then the Fisher's Z-criterion is used as a criterion of their significance. For paired correlation coefficients an interval estimate [ $c_{min}; c_{max}$ ] can be constructed using the Fisher Z-transform with a given reliability [4]. Using the Fisher's Z-transform and the selective correlation coefficient  $r$  we find the corresponding value of Z which is the hyperbolic arctangent of  $r$  [4]:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right) = \operatorname{arctanh}(r).$$

Further we find the value of  $dZ$  corresponding to the confidence level  $p = 0,95$  (the value of the Laplace function). We calculate the values of  $Z_{min}$  and  $Z_{max}$  by the following formulas:

$$Z_{min} = Zr - dZ, \quad (4)$$

$$Z_{max} = Zr + dZ. \quad (5)$$

Finally using the inverse Fisher transform we find the lower and upper bounds for the general correlation coefficient  $c_{min}$  and  $c_{max}$  which are hyperbolic tangents of  $Z_{min}$  and  $Z_{max}$ :

$$r = \frac{\exp(2Z) - 1}{\exp(2Z) + 1} = \operatorname{tanh}(Z).$$

2. The empirical correlation relation  $\eta_{yx}^\epsilon$  is used to estimate the tightness of the nonlinear coupling between random variables and calculated using the common  $\sigma_Y^2$  and the intergroup  $\sigma_{Y_x}^2$  dispersions the formulas of which are indicated in [3]. After all the additional calculations, we find the empirical correlation relation according to the formula [3]:

$$\eta_{yx}^\epsilon = \sqrt{\frac{\sigma_{Y_x}^2}{\sigma_Y^2}}. \quad (6)$$

The coefficient  $\eta_{yx}^\epsilon$  is always in the range from 0 to 1 ( $0 < \eta_{yx}^\epsilon \leq 1$ ). A functional relationship is observed for  $\eta_{yx}^\epsilon = 1$  between the quantities and the quantities are independent for  $\eta_{yx}^\epsilon = 0$ . The relationship between the quantities is linear if  $\eta_{yx}^\epsilon = |r_{xy}|$ . The condition  $\eta_{yx}^\epsilon \geq r_{xy}$  is always satisfied. The verification of the significance of the empirical correlation relation is carried out by the criterion:

$$F_H = \frac{\eta_{yx}^{\epsilon^2}(n - m)}{(1 - \eta_{yx}^{\epsilon^2})(m - 1)}, \quad (7)$$

$$F_{cr} = F(1 - \alpha, m - 1, n - m), \quad (8)$$

where  $F_H$  – calculated value of Fisher’s coefficient;  $F_{cr}$  – theoretical value of Fisher’s coefficient;  $n$  – the number of observations;  $m$  – the number of observations series.

After establishing the significance of the data obtained by means of correlation analysis, we proceed to regression analysis. The tasks of regression analysis are to establish the form of the investigated dependence.

Linear regression reduces to finding an equation of the form:

$$y_x = \alpha_0 + \alpha_1 x, \quad (9)$$

where  $x$  – an individual factor attribute value;  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  – parameters of the straight line equation (regression equation);  $y_x$  – the theoretical value of the resulting factor.

This equation shows the average value of the change in the effective characteristic  $x$  by one unit of its measurement and the sign of the parameter is the direction of this change.

By the classical approach the parameters  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  of the equation are found by the least squares method [4] by which the most suitable regression line is determined minimizing the vertical distance of all points of the correlation field from this line. The distance from each point of the field to the vertical regression line is a random error  $e_i$ . The distance from each point of the field to the vertical regression line is a random error  $e_j$ . Summing up the errors in the square we get the total error minimizing which we can determine the most suitable regression line. To do this, we equate partial derivatives to zero and obtain a system of two linear equations:

$$\begin{cases} \sum y = n\alpha_0 + \alpha_1 \sum x, \\ \sum xy = \alpha_0 \sum x + \alpha_1 \sum x^2, \end{cases} \quad (10)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum xy \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}. \quad (12)$$

Parameter  $\alpha_0$  shows the averaged effect on the effective sign of the factorial signs unaccounted in the equation, parameter  $\alpha_1$  is the regression coefficient and shows the change in the effective sign when the factorial one changes by the unit of its own measurement. Often the studied features have different units of measurement, therefore, to assess the influence of the factor characteristic on the effective elasticity coefficient is used.

The coefficient is calculated for each point and on average for the whole population by the formula:

$$\epsilon = y'_x \frac{x_i}{y_x}, \quad (13)$$

where  $y'_x$  – the first derivative of the regression equation.

The coefficient of elasticity shows the percentage change in the effective feature when the factor attribute changes by 1%. To test the significance of the regression model we use Fisher's criteria:

$$F_H = \frac{r_{xy}^2(n - 2)}{(1 - r_{xy}^2)}, \quad (14)$$

$$F_{cr} = F(1 - \alpha, 1, n - 2). \quad (15)$$

Model significance condition:

$$F_H > F_{cr} \quad (16)$$

As an example of a visual representation of the results of correlation and regression analysis in 3-dimensional space, we use the data of the study of vocal speech as a non-stationary random process described in [5]. The results of data correlation analysis in Matlab can be seen in figure 1.

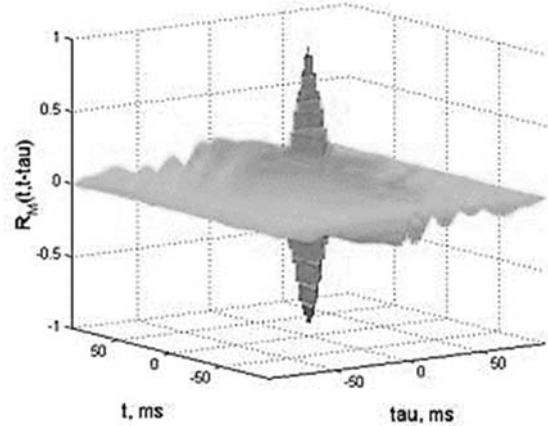


Figure 1 – 3D-presentation of the results of correlation analysis in Matlab

Thus with the help of correlation and regression analysis we can judge the reliability of the data with a certain accuracy as well as having some mathematical model (with the possibility of its implementation in 3-dimensional space), with a certain degree of probability we can predict further research results.

#### References

1. Berezhnaya E.W., Berezhnoy W.I. Mathematical methods of economic systems modeling. The

2nd edition., revised and supplemented – Moscow: Finance and statistics, 2006. – 432 p.

2. Bozrikov A.A. Application of the main economic and statistical methods in the analysis of economic indicators of enterprise development APK. Available in Russian in access mode <http://www.scienceforum.ru/2016/pdf/21302.pdf>.

3. Л.Л. Гладков, Г.А. Гладкова. Теория вероятностей и математическая статистика. – Минск, 2013.

4. ISO 16140:2003 «Microbiology of food and animal feeding stuffs - Protocol for the validation».

5. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review [Text]. General Publishing Company. – 2000. – 1151 p.

УДК 535.3

**RECOMMENDATIONS FOR THE DISPLAY AND ANALYSIS OF THE RESULTS OF MULTIPARAMETER RESEARCH IN HARDWARE AND SOFTWARE ENVIRONMENTS**

**Saukova Y., Alkhimovich M., Mirgorod Y.**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Increasingly, it is necessary to analyze and process the results of multiparameter research of the objects geometric and optical properties at the control and testing of products. The capabilities of modern software and hardware environments allow you to implement these procedures. The purpose of this work is to analyze the capabilities of modern software products from the standpoint of effective 3-D modeling of the results of multiparameter research.

1. Software product of Waterloo Maple Inc. (Canada) Maple is used for analytical mathematical calculations, data visualization, and modeling. Maple has a built-in plot3d function in the kernel for plotting three-dimensional surfaces. There is a possibility to specify the types of coordinate systems using the transformation formulas from a rectangular coordinate system to another, i.e. transformation  $(u, v, w) \rightarrow (x, y, z)$  [1]. To build a graph, we need to set the equation of the function (in explicit or implicit form) and then the program will display its three-dimensional image. The plot3d function allows you to build several shapes that intersect in space at the same time. To do this, instead of describing one surface, we need to specify a list of descriptions of a number of surfaces. An example of such construction for two functions is shown in the figure 1.

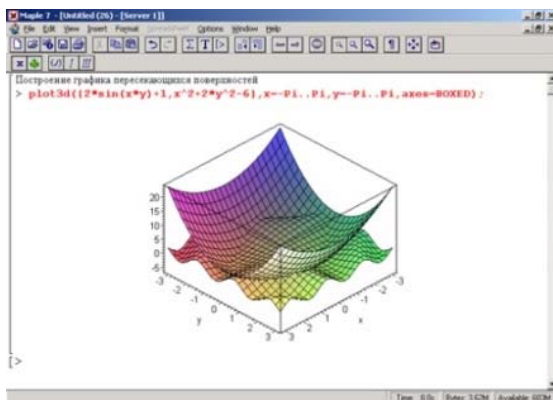


Figure 1 – An example of the construction of surfaces in the environment Maple

Also, special three-dimensional structures can be used, such as GRID (specifying the surface over a portion of the coordinate plane bounded by segments [a, b] and [C, d], according to the data specified by the variable-listlist, see figure 2) or MESH (specifying the data of the listlist variable, which contains the full coordinates of all surface points, it is possible to specify the last one in case of uneven grid).

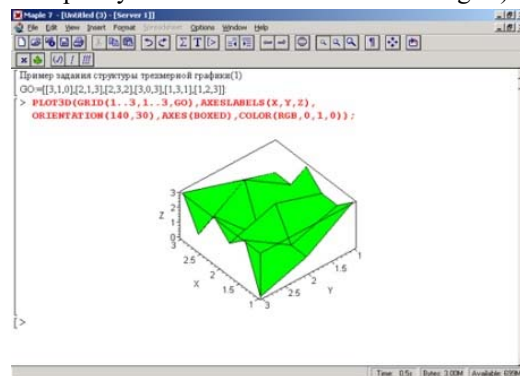


Figure 2 – Example of creating A grid-type graphical structure

2. Software product Mathcad company Parametric Technology Corporation is universal for mathematical modeling and solutions of mass various fields of science and technology. In the Mathcad environment, there are actually no function graphs in the mathematical understanding of the term, but there is a visualization of data located in vectors and matrices (both lines and surfaces are plotted by interpolated points).

Mathcad easily integrates with a huge number of databases and third-party SOFTWARE including Microsoft Excel, MATLAB by MathWorks, etc. The ability to use in the calculation of quantities with dimensions in different systems of units is an advantage of this environment [2]. The results of the calculations also obtain the corresponding dimension. This fact greatly simplifies the tracking of errors in physical and engineering calculations. Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) graphics are used to display and interpret the calcu-

lation results. Two-dimensional graphics implies a graphical representation in the Cartesian (coordinates  $[x, y]$ ) and polar (coordinates  $[r, \varphi]$ ) coordinate system. 3D graphics is used to build three-dimensional surfaces (Surface Plot), contour plots (Contour Plot), 3D histograms (3D Bar Chart) and other three-dimensional objects.

To plot the surface in a certain area of change of independent variables or with a specific step of their change, it is necessary to set the node points  $x_i$  and  $y_j$  which the values of the function will be determined in, and then define the function  $f(x,y)$ , the schedule must be built. After that, it is necessary to form a matrix of function values in the form of:

$$A_{i,j} = f(x_i, y_j). \quad (1)$$

After the command Insert→Graph→Surface Plot we enter the name of the matrix in the graphics area that appears without indexes. An example of plotting a graph in Mathcad is shown on figure 4.

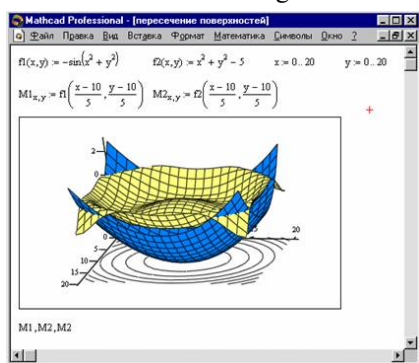


Figure 4 – Graph Display in Mathcad

3. MATHEMATICA is Wolfram Research's computer algebra system, which is one of the most powerful and widely used integrated multimedia software systems and recognized as a fundamental achievement in the field of computer design. [3] The system provides calculations with any given accuracy; construction of two- and three-dimensional graphs, their animation, drawing of geometric figures; import, process, export images and sound. The main opportunities for 3D data visualization and graphing of dependencies 3 or more quantities represented by the following functions ([4], [5]). Plotting a 3D graph of the function of two variables  $f(x, y)$  is performed using the Plot3D function (see figure 5):

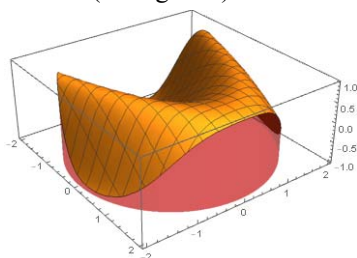


Figure 5 – Visualizing the function of two variables in MATHEMATICA

The ListPlot3D function is used to plot a three-dimensional scatter plot of data, the ListDensityPlot3D function is used for the three-dimensional plotting of the  $f(x,y,z)$  function. The VectorPlot3D function allows you to display vector field graphs over a dataset, and the ListVectorPlot3D function is used to display experimental or simulated 3D data. The SliceVectorPlot3D function is used to display the cross section of a vector field of a given function by some surface. If the field function is unknown but the dataset is present then the ListSliceVectorPlot3D function can be used. The AnatomyPlot3D function is responsible for visualization three-dimensional graphical representations of anatomical units (figure 6).



Figure 6 – Visualization of anatomical units 3D-models in MATHEMATICA

In addition to extensive visualization capabilities of three-dimensional data Wolfram Mathematica has a powerful system of analysis and processing of the results of multiparameter research of the objects geometric and optical properties at the control and testing of product. Operations on these multidimensional data are possible not only in rectangular Cartesian, cylindrical and spherical coordinates, but also in arbitrarily specified coordinate systems due to the support of affine transformations. The considered software products are an effective application tool for high-resolution colorimetry in software and hardware environments.

### References

1. Methods of solving mathematical problems in Maple: textbook / S.E. Savotchenko, T.G. Kuzmitcheva. In Russian. Belgorod: Publishing Belaudit. – 2001. – 116 p.
2. N.D. Denisov-Vinsky. Mathcad in solving problems in higher mathematics. Moscow. MIEE. 2009. – 93 p.
3. Tarantchuk, V.B. Main functions of computer algebra systems: manual for students of the applied mathematics and Informatics faculty / V.B. Tarantchuk. – Minsk : BGU, 2013. – 59 p.
4. Tarantchuk, V.B. Introduction to Mathematica graphics: manual for students of the applied mathematics and Informatics faculty / V.B. Tarantchuk. – Minsk : BGU, 2017. – 53 p.
5. Wolfram Language & System Documentation Center. <https://reference.wolfram.com/language>.

## MODERN MODELS OF THE EXTENDED UNCERTAINTY AND THEIR APPLICATION IN INDUSTRIAL METROLOGY

Saukova Y., Zlobina U., Kulshova A.

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

At present, in the practice of accredited laboratories, attention is being paid to identifying and assessing risks, and hence to calculating increased uncertainty, because according to ISO 9000 [1], the risk is the impact of uncertainty. The analysis of the last published works allowed to identify and formulate the main approaches to calculating the expanded uncertainty and to show their effectiveness.

The most general approach is outlined in GUM, where a z-model is presented, based on the product of total uncertainty and coverage factor:

$$U = z_{95} \sigma[\bar{q}] = z_{95} \frac{\sigma[q]}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

where  $z_{95}$  – coverage ratio for the 95 % confidence level under the assumption of a normal distribution;  $\sigma[\bar{q}]$  – the experimental standard deviation for  $\bar{q}$ ;  $\sigma[q]$  – the experimental standard deviation for  $q$ .

However, depending on the measurement tasks, variations of this model are used – such as the Student's t-model, the Bayesian Z-model, the Craig model and the Monte Carlo method, which does not use the coverage factor.

In work [1] three models are considered – Student, Bayes and Craig. The main difference between these models is the different values of coverage factors.

The Student's model (t-model), developed in 1908, looks like this:

$$U_s = t_{95} \times s[q], \quad (2)$$

where  $t_{95}$  – coefficient with 95 % coverage interval;  $s[q]$  – standard deviation.

The Craig model (1927), developed in the works of Hening Huang (2010), is presented below:

$$U_s = \frac{z_{95}}{c_4} \times s[\bar{q}], \quad (3)$$

where  $t_{95}$  – coefficient with 95 % coverage interval;  $c_4$  – function of the sample size, which is calculated as follows:

$$c_4 = \sqrt{\frac{2}{N-1}} \times \frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}. \quad (4)$$

In this case,  $\Gamma$  is introduced as a gamma function.

In addition, when the conditions of the central limit theorem are satisfied, but the reliability condition is not fulfilled, the probability distribution of the measurement result is described by the Student's distribution (t-distribution) with effective degrees of freedom  $v_{eff}$ :

$$U_s = v_{eff} \times s[q]. \quad (5)$$

Estimation of effective degrees of freedom  $v_{eff}$  for standard measurement uncertainty  $u_c(y)$  is carried out with the help of the Welch-Sutterswain formula:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}, \quad (6)$$

where  $u_i(y)$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) – contributions to the standard uncertainty of the measurement, which corresponds to the estimate  $y$  output quantity;  $v_i$  – the effective degree of freedom of contribution to uncertainty  $u_i(y)$ .

In [2] the expression (5) is decomposed into components of uncertainty, estimated by type A and by type B:

$$v_{eff} = \frac{[\sum(\theta_i \sigma_i)^2 + \sum(\theta_i \beta_i)^2]^2}{\left[ \sum \left( \frac{(\theta_i \sigma_i)^4}{v_i^A} \right) + \sum \left( \frac{(\theta_i \beta_i)^4}{v_i^B} \right) \right]}, \quad (7)$$

where  $\sigma$  – standard uncertainty estimated by type A;  $\beta$  – standard uncertainty estimated by type B;  $\theta$  – contribution to total uncertainty.

The Z-model The Bayesian model looks like:

$$U_s = \frac{z_{95}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\gamma^2}}} \times [g] \quad (8)$$

or

$$U_s = \frac{z_{95}}{\sqrt{1 + \gamma^2}} \times s_p[q], \quad (9)$$

where  $\gamma$  is the ratio of the previous value of the standard uncertainty  $s_p[q]$  to the experimental standard uncertainty of the current measurement  $s[q]$ :

$$\gamma = \frac{s_p[q]}{s[q]}. \quad (10)$$

In 1998, Phillips suggested that the coverage factor be equal to  $z_{95}$ , based on the post-a priori information.

Today, another method for estimating uncertainty is known to modern science – the Monte Carlo method (hereinafter MCM), which is a kind of estimation of type A uncertainty. This method has been known since 1949, from the publication of the article by Nicholas Metropolis and Stanislaw Ulam «The Monte Carlo Method». The difference between this model and the above is that the calculation does not use the coverage factors, but calculates the coverage interval. The method can be applied to practically all models having a single input value in which the input quantities can be characterized by any proba-

bility distribution functions. Often this method is called a statistical test method because of the need for a large number of test results.

The author of the article [2] in his work compared the application of the MCM method to the previously considered methods of estimating uncertainty. Student's model, in the analysis of measurements, has a very high probability of a random error, when using this method on arrays of small volumes. And also, the model has a significant shift from the true value of uncertainty.

The Student's model is recommended to be used when the standard deviation is unknown, and the number of observations in the series is less than 30.

The next model of comparison with MCM was the Craig model. The simulated errors are also scattered, but the scattering range is much smaller in comparison with the Student's model. Also, it can be noted that the average value of simulated uncertainties almost coincides with the true value of uncertainty. And, consequently, the risk of assuming subsequent errors associated with the procedure for calculating uncertainty is reduced. Therefore, when comparing the model of Craig and Student, it is reasonably recommended to use the Craig model.

The Bayesian model, of all the considered, has the smallest dispersion of uncertainty values. A distinctive feature is that the final uncertainty value is less than the true uncertainty value. This is due to the fact that the true value is related to the average value from the array of observations. Therefore, when calculating the uncertainty in this method, it is necessary to take into account this feature and introduce a correction factor. The calculation of MCM in the Bayesian Model is equated to the value of the standard uncertainty and is felt in the calculation.

The analysis is assisted by a graphical interpretation of the scattering results of the simulated extended uncertainty.

At the present stage, three models are available in the literature for calculating expanded uncertainty using standard deviation. When comparing these models by the Monte Carlo method and by studying a possible random error or a shift in the calcu-

lated extended uncertainty, several recommendations were made for using models. The student model is the least accurate. The Craig model is more accurate than the student model, and it is recommended to use it when a priori (preliminary) information is not available. The model is the most accurate and preferred, but only with sufficient preliminary information.

Comparing the models presented above, it can be noted that, unlike the t Student model and the Craig Model, in calculating the uncertainty, the Bayesian model is not related to the current average value of the measurements. Based on the received a priori information about the models, we can talk about the recommendation of using the Bayesian model in estimating the uncertainty.

The Conclusion. A review of the extended uncertainty models showed that they differ in the specific component of the experimental data in the combined uncertainty budget. The GUM z-model and Monte Carlo model are used in measurements with a large number of observations while the z-model is used for the normal distribution of measurement results, the Monte Carlo model is more universal. The Student's and Craig models are applied for a small number of observations of less than 30, and the Bayes model based on the Welch-Suttersweit equation is applied at the combined budget and performance of the Central Limit Theorem. In addition, approaches to the description of measurement results in discrete systems (e. g. ISO 15530) and for nonparametric systems are currently being developed.

#### References

1. ISO 9000:2015 «Quality management systems. The terms and definitions».
2. Hening Huang. Comparison of Uncertainty calculation models. – 26.07.2016.
3. S.V. Crowder, E.J.T. Burns, P. Thacher Estimating Uncertainty in Laboratory Neutron Measurements Made with a Lead Probe Scaler Detectorю Sandia National Laboratoriesю P.O. Box 5800. Albuquerque, New Mexico 87185.

УДК 006.91

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ОАО «КРИНИЦА»

Савкова Е.Н.<sup>1</sup>, Клевитская Е.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «Криница», Минск, Республика Беларусь

В соответствии с [1] качество пива оценивается более чем 20 показателями качества, а именно физико-химическими, органолептическими, показателями безопасности, микробиологическими показателями.

Основными физико-химическими показателями качества пива являются – объемная доля спирта и массовая доля сухих веществ в начальном сусле, которые определяются по ГОСТ 12787.

Стандарт на данные методы испытаний разработан еще в 80 годах прошлого века и является «морально устаревшим», поэтому испытательная лаборатория ОАО «Криница» внедрила в свою деятельность измерительный модуль Alcozyzer Beer ME (Австрия), состоящий из анализатора содержания спирта Alcozyzer ME и анализатора плотности жидкостей серии DMA 4500M.

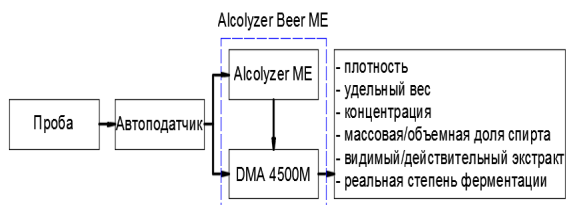


Рисунок – Принципиальная схема измерений

В настоящее время данный измерительный модуль включен в Государственный реестр средств измерений, допущенных к применению в сфере законодательной метрологии на территории Республики Беларусь в части анализатора плотности жидкостей серии DMA и поверяется с использованием стандартных образцов (далее – СО) плотности жидкости не отечественного происхождения. Анализатор содержания спирта Alcozyzer ME прошел метрологическую аттестацию и в данный момент калибруется с использованием эталонного ареометра первого разряда не отечественного происхождения и приготавливаемых в лаборатории водно-спиртовых растворов без их аттестации.

Документ СТБ ИСО/МЭК 17025 предлагает следующие способы обеспечения метрологической прослеживаемости:

- применение СО;
- применение установленных методов и (или) согласованных эталонов.

Основная проблема реализации метрологической прослеживаемости от измерительного модуля Alcozyzer Beer ME до единиц SI является то, что в Республике Беларусь отсутствует национальный эталон единицы плотности, несмотря на то, что он был включен в Государственную научно-техническую программу «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» («Эталоны и научные приборы») с 2011 года.

На данный момент для анализатора спирта Alcozyzer ME можно предложить два сценария для обеспечения прослеживаемости результатов измерений путем выбора метрологической основы для сравнения:

- 1) Основа для сравнения – стандартный образец;
- 2) Основа для сравнения – референтная методика.

Планируемый к разработке государственный стандартный образец (далее ГСО) предназначен

для осуществления метрологического контроля, а именно поверки анализатора спирта Alcozyzer ME и передачи размера единицы плотности от ГЭТ 18-2014 Российской Федерации к рабочим средствам измерений.

Предполагаемые материалы для изготовления ГСО: спирт этиловый по ГОСТ 18300, вода дистиллированная по ГОСТ 6709.

Выбор материалов обусловлен следующим:

- стандартный образец должен быть достаточно вязким для прохождения по трубопроводу прибора без угрозы его целостности и работоспособности;
- однородность водного раствора этанола выше, чем у эфира и гелеобразных веществ, получаемых синтезом с использованием этилового спирта;
- растворы более удобны в применении (ими можно заполнить колбы системы автоматической подачи проб).

В комплект СО предлагается включить четыре экземпляра ГСО с соответствующими сертифицированными значениями – установленными значениями объемной доли спирта, а в качестве проверки нулевой точки – вода дистиллированная. Использование комплекта СО обуславливается необходимостью создания широкого диапазона значений объемной доли спирта (от 0 до 10 %).

Неопределенность значений СО обуславливается, в общем случае, внутриэкземплярной изменчивостью, определяемой стандартным отклонением значений в пределах одного стандартного образца из комплекта. Неопределенность определения сертифицированных значений стандартных образцов определяется по формуле:

$$u(R) = \sqrt{u_{meas}^2 + u_{ref,k}^2}, \quad (1)$$

где  $u_{meas}$  – неопределенность реализуемой системы измерений (для определения влияющих факторов используется технология S.W.I.P.E.);  $k$  – идентификатор экземпляра стандартного образца;  $u_{ref,k}$  – неопределенность определения точечной оценки экземпляра ГСО, определяется как стандартное отклонение:

$$u_{ref,k} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_{ik} - R_k)^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер наблюдения ( $i = 1 \dots n$ ).

Расширенную неопределенность сертифицированного значения ГСО следует определять по формуле:

$$U_{ref,k} = k \cdot u(R), \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, значение которого выбирается в зависимости от предполагаемого вида распределения измеряемой величины и доверительной вероятности. При нормальном законе распределения измеряемой величины коэффициент охвата принимается равным 2 при доверительной вероятности  $P = 0,95$

В соответствии с ГОСТ 8.315 погрешность сертифицированного значения определяется границами допускаемого значения погрешности с доверительной вероятностью  $P = 0,95$  и выражается в виде абсолютного значения погрешности сертифицированного значения для каждого отдельного экземпляра. Планируется получить данное значение путем межлабораторных сличений как разность двух полученных значений:

$$\Delta_{ref,k} = R_{ref,k} - R_{stand,i}, \quad (4)$$

где  $R_{ref,k}$  – сертифицированное значение параметра ГСО;  $R_{stand,i}$  – известное значение объемной доли спирта.

Когда невозможно установить прослеживаемость к единице измерения SI или другой единице измерения, референтная методика измерений должна быть согласована на национальном/международном уровне, и эта методика должна выступать в качестве единственной основы для сравнения.

Референтная методика измерений – методика измерений, признанная пригодной для получения результатов измерений, которые могут быть использованы для оценки правильности измеренных значений величины, полученных по другим методикам измерений величин того же рода, а также для калибровки или для определения характеристик СО [4].

Первичная референтная методика измерений – референтная методика измерений, используемая для получения результата измерения без соотнесения с эталоном единицы величины того же рода [4].

В качестве основного средства измерений при реализации референтной методики выполнения измерений концентрации и плотности был предложен анализатор плотности жидкостей DMA 5000M (Австрия), реализующий вибрационный

метод измерений. Он является наиболее быстрым в реализации, не требует контроля температуры измеряемой пробы, так как анализатор имеет встроенный платиновый термпреобразователь.

При этом декларируемые производителем метрологические характеристики анализатора плотности жидкостей DMA 5000M являются наивысшими для Республики Беларусь.

В соответствии с ГОСТ 8.010 был составлен алгоритм разработки МВИ по определению концентрации и плотности в пищевой алкогольной продукции. Контроль показателей точности результатов измерений в лаборатории при МВИ можно осуществлять, используя метод контроля стабильности стандартного отклонения воспроизводимости, и правильности с применением контрольных карт Шухарта. Периодичность контроля и процедуры контроля стабильности результатов измерений должны быть предусмотрены в Руководстве по качеству лаборатории в соответствии с п. 4.2 СТБ ИСО/МЭК 17025.

### Литература

1. СТБ 395-2017 «Пиво. Общие технические требования».
2. Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХІІ».
3. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / пер. с англ. и фр. Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
4. Метрологическая прослеживаемость результатов измерений в химии: понятия и реализация. Технический отчет IUPAC / пер. с англ. М. Рожнов, В. Гаврилкин; Т. Забродская; Е. Левбарг; Т. Макачук; Д. Мельник; – Киев.: Укрметртестстандарт. – 2014. – 90 с.:

УДК 666.672

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ ТИПА RO НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Карниевич А.А.<sup>1</sup> Сернов С.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Керамические материалы огнеупорного назначения синтезированы в области кристаллизации муллита и тиалита системы  $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$  с использованием глинистого сырья, технического глинозема и диоксида титана. Как известно [1], тиалитсодержащая керамика характеризуется высокой температурой и недостаточной степенью спекания.

Поэтому представляет интерес изучить влияние минерализаторов на процесс спекания и свойства алюмотитансиликатной керамики. В их качестве были выбраны MgO, CaO, ZnO, SrO и

BaO, которые вводились в керамическую массу в количестве 2,5, 5,0, 7,5 мас. % в виде чистых оксидов или карбонатов. Свойства образцов (открытая пористость, водопоглощение, кажущаяся плотность и температурный коэффициент линейного расширения) представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, свойства опытных образцов изменяются при введении оксидов типа RO неодинаково и не очень существенно, за исключением некоторых оксидов.

Зависимость водопоглощения образцов от вида и количества добавок представлена на рисунке 1.



Таблица 1. Свойства опытных образцов в зависимости от вида и количества добавок, обожженных при температуре 1300 °С

| Вид и количество добавки, % | Пористость открытая, % | Водопоглощение, % | Плотность кажущаяся, кг/м <sup>3</sup> | ТКЛР, α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Без добавки                 | 24,7                   | 9,43              | 2,5                                    | 38,3                                     |
| MgO 2,5                     | 26,8                   | 12,0              | 2,16                                   | 3,82                                     |
| 5,0                         | 26,4                   | 12,4              | 2,2                                    | 2,76                                     |
| 7,5                         | 25,1                   | 11,5              | 2,18                                   | 2,34                                     |
| ZnO 2,5                     | 20,6                   | 8,7               | 2,37                                   | 42,0                                     |
| 5,0                         | 20,2                   | 8,5               | 2,38                                   | 42,3                                     |
| 7,5                         | 19,5                   | 8,1               | 2,41                                   | 44,1                                     |
| CaO 2,5                     | 15,25                  | 6,2               | 2,46                                   | 45,6                                     |
| 5,0                         | 22,1                   | 9,8               | 2,28                                   | 41,8                                     |
| 7,5                         | 31,7                   | 15,8              | 2,01                                   | 48,5                                     |
| SrO 2,5                     | 23,0                   | 10,0              | 2,3                                    | 42,3                                     |
| 5,0                         | 19,8                   | 8,7               | 3,4                                    | 42,0                                     |
| 7,5                         | 20,5                   | 8,6               | 2,39                                   | 46,3                                     |
| BaO 2,5                     | 20,4                   | 8,8               | 2,3                                    | 49,1                                     |
| 5,0                         | 15,6                   | 6,4               | 2,45                                   | 43,3                                     |
| 7,5                         | 15,4                   | 6,3               | 2,39                                   | 47,3                                     |

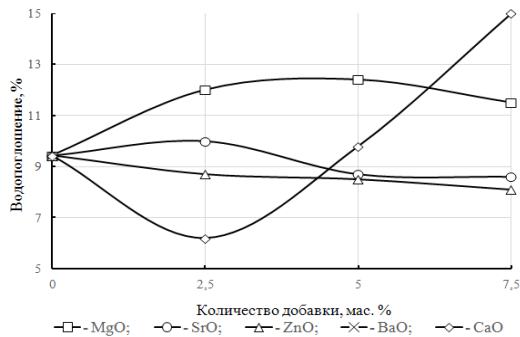


Рисунок 1 – Влияние вида и количества добавок типа RO на водопоглощение опытных образцов

Анализируя полученные данные видно, что добавки ZnO, SrO и BaO снижают водопоглощение образцов, MgO несколько повышает этот параметр, а CaO в количестве до 2,5 % снижает, причем довольно значительно, а затем резко повышает водопоглощение до 15 %. Наиболее стабильно и ощутимо снижает водопоглощение BaO (до 6,3 %). Наибольшие изменения этого параметра наблюдаются при малых добавках RO, при повышении их количества от 5 до 7,5 %, наклон кривой во всех случаях уменьшается, кроме образцов с CaO.

Зависимость кажущейся плотности и открытой пористости образцов от вида и количества RO находится в полной корреляции с рассмотренной зависимостью водопоглощения, т. е. MgO снижает плотность образцов, оксиды цинка, стронция, бария способствуют ее некоторому повышению и снижению открытой пористости.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что введенные оксиды RO не способствуют активно развитию жидкофазного механизма спекания. Согласно данным [2], элементы одной группы, обладающие сходными химическими характеристиками, по мере уменьшения их

атомной массы, более активно воздействуют на реакционную способность жидкой фазы. При одинаковом массовом содержании элементов в керамической смеси количество атомов будет больше для элемента с меньшей атомной массой. Чем больше присутствует атомов, тем больше количество разрывов связей, а значит и эффективнее действие добавок. Однако, в данном случае наблюдается обратная картина, наибольшее влияние оказывает оксид бария, т. е. элемент с большей атомной массой, а наименьшее – оксид магния, т. е. с малой массой, что не соответствует данным по другим ранее изученным системам. Вероятно, при спекании алюмотитансиликатной керамики жидкой фазы образуется мало и, поэтому, вводимые оксиды не могут в полной мере проявить свое деполимеризующее действие на структуру расплава. Они влияют больше на коэффициент диффузии в твердой фазе и здесь роль играет размер ионного радиуса катиона.

Следует отметить более значительное влияние RO на фазовый состав материалов, как качественный, так и количественный. Изменение фазового состава в зависимости от вида и количества добавок представлено в таблице 2.

Таблица 2. Фазовый состав опытных образцов с различными добавками RO

| Вид добавки    | Основные кристаллические фазы    | Дополнительные кристаллические фазы                                             |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Без добавки    | Муллит, титанат алюминия, рутил  | Корунд                                                                          |
| С добавкой MgO | Муллит, рутил, кордиерит (7,5 %) | Титанат алюминия, титанат магния, кордиерит, корунд, силлиманит                 |
| CaO            | Муллит, рутил                    | Геленит (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ), алюминат кальция   |
| SrO            | Муллит, рутил                    | Корунд, титанат стронция                                                        |
| BaO            | Муллит, рутил                    | Титанат бария, цельзиан (BaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub> ) |

Из таблицы 2 видно, что оксид магния больше всего усложняет фазовый состав материала, дифрактограмма образцов сложная, с большим количеством дифракционных максимумов. Обильное фазообразование препятствует спеканию. Оксид кальция, взаимодействуя с компонентами массы, образует свои кристаллические фазы, что, как известно, сопровождается увеличением объема, пористости и уменьшением кажущейся плотности. Этим можно объяснить резкий рост водопоглощения образцов при увеличении количества CaO.

С введением BaO и SrO дифрактограммы образцов упрощаются, что свидетельствует о повышении степени совершенства кристаллической структуры, причем оксид стронция практи-

чески не дает самостоятельной кристаллической фазы, а BaO выделяется в виде цельзиана и титаната бария.

Замечено, что практически все добавки приводят к уменьшению количества титаната алюминия или к полному его исчезновению. Это, безусловно, может отразиться на важном свойстве этой керамики – термическом расширении.

На рисунке 2 представлена зависимость ТКЛР образцов от вида и количества RO.

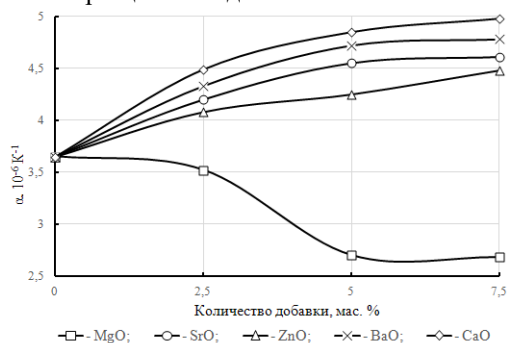


Рисунок 2 – Влияние количества и вида добавок типа RO на ТКЛР опытных образцов

Характер кривых практически одинаков для всех оксидов, за исключением MgO. С повышением количества добавок ТКЛР увеличивается, т.к. изменяется фазовый состав, уменьшается или исчезает малорасширяющийся титалит,

растет количество рутила, появляются RO-содержащие фазы. Аномалию изменения ТКЛР образцов с добавками MgO можно объяснить выделением кордиерита, имеющего низкое термическое расширение.

Таким образом, установлено, что оксиды типа RO оказывают влияние на процесс спекания и свойства материала на основе системы  $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ , которое находится в зависимости от атомной массы и ионного радиуса вводимого минерализатора [3]. Из исследованных добавок практический интерес представляет оксид бария.

### Литература

1. Конструктивная термостойкая керамика на основе алюмосиликатной системы / Е.М. Дятлова, Н.М. Бобкова, В.Н. Самойлова, Т.Н. Юркевич // Стекло и керамика. – 1988. – № 8. – С. 18–20.
2. Аппен, А.А. Химия стекла. – М. : Стройиздат, 1978. – 259 с.
3. Термостойкая муллит-титанитовая керамика для обжига деталей электронной техники / Е.М. Дятлова, О.А. Сергеевич // Сотрудничество – катализатор инновационного роста : сб. материалов 4-го Бел.-Балт. форума, Минск, 31 мая–1 июня 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018 г. – С. 66–67.

УДК 006.053

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА ПУТЕМ ПРИВЛЕЧЕНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ФОКУС-ГРУППЫ ИЗ ЧИСЛА ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН

Бужан И.А., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

На сегодняшний день в Республике Беларусь остро стала проблема недостаточного участия представителей промышленности и бизнеса в формировании технического законодательства, непосредственно регулирующего их сферы деятельности. В условиях снижения спроса на основных рынках и, как следствие, значительно ухудшения показателей деятельности организаций, необходимо приложить максимальные усилия по повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Повлиять на это возможно путем активного участия в международной и национальной стандартизации, в том числе в разработке и применении международных и европейских стандартов, которые устанавливают минимально приемлемый уровень требований для новой продукции при выпуске ее в обращение на зарубежные рынки и для удержания позиций на внутреннем рынке. Кроме того, участие в создании единой системы технического регулирования в ЕАЭС позволит

сформировать объективные приемлемые перспективные требования к продукции и методам ее испытаний, включение в технические регламенты ЕАЭС которых упростит процесс адаптации к новым условиям на рынке.

Потребность в стандартизации как деятельности появляется при необходимости оптимального упорядочения требований, возникающих в сфере производственно-технических, торговых и иных деловых отношений между разработчиками, изготовителями, поставщиками, потребителями, органами государственного управления под влиянием таких факторов, как научно-технический прогресс, безопасность, защита прав потребителей, глобализация рынка, международное сотрудничество и т.п. Различные требования каждой из сторон являются ключевой причиной неупорядоченности в конкретной области. Стандартизация выполнила свою миссию, если достигнута оптимальная степень упорядочения требований сторон.

Ежегодно в соответствии с Планом государственной стандартизации в Республике Беларусь разрабатывается около 300 государственных стандартов (далее – СТБ, стандарт). При этом потребность в разработке около 600 стандартов в год.

В то же время, по результатам анализа фонда ТНПА было установлено, что около 35 % разработанных стандартов отменяются в течение первых пяти лет их действия, а около 20 % стандартов отменяют на 6-7 год. Таким образом, около половины разработанных документов служат в среднем 5 лет.

Отметим, что в процессе стандартизации есть одна важная особенность: заказчик (чаще Госстандарт РБ) не в состоянии в полной мере оценить качество выполненной работы по разработке стандарта. Выполненная работа оценивается больше по формальному признаку, а объективная оценка разработанного стандарта будет осуществляться лишь после его издания и утверждения непосредственными пользователями в течение последующих лет. В соответствии с ТКП 1.2, официальный пересмотр стандарта после публикации осуществляется спустя 5 лет.

Разрабатываемый документ находится под влиянием трех входящих групп факторов: информации о нормируемом объекте, взаимосвязанных НД и ТНПА и разработчика. Т. е. с целью повышения качества первой редакции проекта стандарта на выходе существует лишь три возможные варианта для изменений:

1. Повысить достоверность и полноту исходной информации о нормируемом объекте. Возможно путем изменения источников информации. На сегодняшний момент большую долю информации разработчик получает из сети Internet и книг, находящихся в свободном доступе. Зачастую подобная информация является неполной, не всегда профессиональной и/или неактуальной. Достаточно затруднительно отыскать там достоверную и актуальную информацию, особенно если речь идет о нюансах производства или иных специфических моментах.

2. Изменить требования влияющих на нормируемый объект НД и ТНПА. В ходе разработки невозможно.

3. Повысить уровень компетентности разработчиков. Идеальный вариант – разработчик знает все об объекте нормирования и долгое время работает с ним непосредственно и в то же время он является специалистом в разработке стандартов. Такой человек, с большой долей вероятности, напишет первую редакцию проекта стандарта гораздо более приближенную к окончательной версии документа. Сложность в том, что таких специалистов единицы и в большинстве случаев один и тот же человек не обладает подобным набором знаний о различных объектах как того требует специфика работы инженера по стандартизации.

Таким образом, из возможных факторов, влияющих на качество проекта стандарта, с наименьшими затратами можно повлиять лишь на качество исходной информации. Для создания качественного проекта государственного стандарта разработчик должен обладать действительной актуализированной информацией из различных источников, включая перспективные решения. Чего в существующих условиях разработчику достичь весьма проблематично.

После составления первой редакции проекта стандарта для разработчика еще одним источником получения информации об объекте является рассылка проекта стандарта на отзыв. Рассылка может осуществляться не в один этап. Однако о строгой зависимости качества стандарта от количества рассылок говорить нельзя, т. к. качество разрабатываемого стандарта будет в большей степени зависеть от компетентности, ответственности и заинтересованности людей, составляющих отзывы.

Коротко опишем предлагаемый порядок разработки государственного стандарта:

1. Определение и анализ предметной области;
2. Разработка технического задания;
3. Формирование фокус-группы из числа представителей заинтересованных сторон;
4. Утверждение ТЗ и состава фокус-группы;
5. Сбор информации об объекте стандартизации;
6. Разработка анкеты для опроса участников фокус-группы;
7. Организация и проведение опроса;
8. Обобщение, оценка данных анкетирования и принятие решения по структуре и параметрам стандарта;
9. Формирование первой редакции проекта стандарта СТБ/ПР\_1;
10. Рассылка проекта на отзыв;
11. Составление сводки отзывов и формирование окончательной редакции проекта стандарта СТБ/ОР;
12. Экспертиза и утверждение СТБ.

Нами предлагается не разрабатывать по абстрактным сведениям первую редакцию проекта стандарта, а провести разведочный анализ данных путем опроса заинтересованных сторон с целью определения номенклатуры показателей качества объекта стандартизации, нуждающихся в нормировании, а также установления диапазонов допустимых значений, которые будут считаться приемлемыми и выполнимыми заинтересованными сторонами по каждому из параметров.

Анализ будет отличаться в зависимости от степени существующей проработанности и упорядоченности материала, а также с учетом целевых значений и результатов установившейся практики. Принципиально подходы будут различаться в двух случаях:

а) предметная область проработана, существуют действующие нормы и требования на международном, региональном либо на национальном уровне стран, занимающих ведущие позиции в нормируемой области. Основной целью рассылаемого опроса будет получение сведений о возможности выполнения уже действующих на других уровнях норм.

б) предметная область не проработана. Целями анализа будут определение номенклатуры параметров, которые необходимо нормировать в предполагаемой области, а также оценка близительных значений параметров.

Для некоторых показателей на этом этапе удастся выделить широкую «зону консенсуса», которая позволит учесть интересы всех заинтересованных сторон, а также выявить показатели, которые не вошли в чьи-то перечни требований к объекту, либо показатели, допустимые значения которых для данного объекта существенно различаются.

Лишь после обработки результатов анкетирования мы предлагаем приступать к непосред-

ственному формированию первой редакции стандарта на основе полученных сведений.

С момента формирования первой редакции, процесс разработки стандарта возвращается к процессу разработки, описанному в ТКП 1.2.

Данный метод позволит изменить принципиальный подход к разработке государственных стандартов. В нашем случае, разведочный анализ данных и анкетирование заинтересованных сторон будут работать с опережением и позволят изначально формировать будущим пользователям требования в стандартах.

Традиционная первая редакция стандарта – это шаблон, который, с точки зрения психологии, сложно переструктурировать и принципиально изменить заинтересованной стороне. Навязанный с первой редакцией стереотип приводит к внесению корректив в полученный текст, а не к изложению собственных соображений относительно объекта стандартизации. В результате, эксперт в предметной области идет на поводу у стандартизатора, что принципиально не верно. Однако, с точки зрения методологии, все выполняется безукоризненно.

УДК 658.5

## **ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Серенков П.С., Герасимёнок Е.М.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

На производственных предприятиях, а в особенности на предприятиях с большим жизненным циклом продукции (к примеру, как ОАО «Керамин») от момента начала производства (разработки) до момента получения готового продукта может проводиться огромное количество разнообразных измерений. При этом, зачастую от результатов измерений параметров исходного сырья, а также промежуточных продуктов (полуфабрикатов) зависит выбор параметров производственного процесса. Становится очевидным, что все измерения, в силу своей важности для достижения конечной цели – высокого качества продукции и минимизации издержек – должны быть продуманы, проанализированы, и должны подвергаться особому контролю. Иначе говоря, вся система измерений на предприятии должна быть «высокого качества».

Обеспечить получение достоверных результатов измерений, целесообразность проведения измерений на тех или иных стадиях жизненного цикла продукции, необходимость и достаточность средств измерений позволяет система менеджмента измерений.

Система менеджмента измерений (СМИ) – совокупность взаимосвязанных и/или взаимодействующих элементов, необходимых для обеспечения соответствия процессов измерений

метрологическим требованиям и нормам и управления ими. [1]

Эффективная система менеджмента измерений обеспечивает пригодность измерительного оборудования и процессов измерений для их предполагаемого использования и имеет большое значение для достижения целей в области качества продукции и благодаря снижению вероятности появления недостоверных результатов измерений. Цель системы менеджмента измерений состоит в управлении измерительным оборудованием и процессами измерений, позволяющем контролировать достоверность результатов измерений характеристик, влияющих на качество продукции. Система менеджмента измерений предусматривает проверку измерительного оборудования и применение статистических методов управления процессом измерений. [1]

Система менеджмента измерений является новым явлением для предприятий Республики Беларусь. В ISO разработан стандарт, предъявляющий требования к системе менеджмента измерений: ISO 10012:2003 «Системы менеджмента измерений. Требования к измерительным процессам и измерительному оборудованию». В Республике Беларусь введен в действие гармонизированный стандарт СТБ ИСО 10012-2004 «Системы управления измерениями. Требования

к процессам измерений и измерительному оборудованию» [1]. В Российской Федерации также введен в действие гармонизированный стандарт ГОСТ Р ИСО 10012-2008 «Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию» [2].

Системы менеджмента измерений имеет схожую структуру со структурой СМК, однако система менеджмента измерений имеет более узкую область применения и позволяет обеспечивать ту долю качества продукции, которая так или иначе зависит от качества измерений.

Поэтому процессы измерений должны рассматриваться как процессы, направленные на поддержание качества продукции, производимой организацией [1]. На рисунке 1 представлен алгоритм применения модели системы управления измерениями в соответствии с требованиями СТБ ИСО 10012.



Рисунок 1 – Модель системы управления измерениями

Согласно этой модели, вся деятельность метрологической службы на предприятии в целом, становится предметом управления СМИ и разбивается на ряд взаимосвязанных и взаимодействующих подпроцессов, в том числе «метрологическое подтверждение» и «процесс измерений».

Все процессы в системе менеджмента измерений, как и в системе менеджмента качества, рассматриваются на основе цикла PDCA (Планируй-Делай-Проверяй-Действуй) для уменьшения отклонений от заданных или плановых значений в их выходах [3].

Требования стандарта СТБ ИСО 10012 не предназначены для дополнения, исключения или замены каких-либо требований других стандартов [2], т. е. СМИ является самодостаточной системой, функционирующей на предприятии независимо от других систем. Выполнение требований, установленных в стандарте, позволяет упростить процедуру приведения в соответствие своих требований на измерения и управления процессами измерений с требованиями, установленными в других стандартах [2].

Руководством ОАО «Керамин» была сформулирована задача по разработке информационно-методического обеспечения системы менеджмента измерений в рамках СМК организации.

Для разработки и внедрения эффективной системы менеджмента измерений, прежде всего, должен быть выполнен комплекс действий по изучению существующего порядка обеспечения достоверности результатов измерений, испытаний и контроля на предприятии, выявлению несоответствий, их классификации и анализу, изучению способов устранения выявленных несоответствий по всем направлениям: несоответствия в структуре метрологической службы, несоответствия всех видов ресурсов (количества и качества) и т. д. Далее на основе полученных данных уже могут осуществляться работы по планированию, разработке и внедрению системы менеджмента измерений.

Определен алгоритм решения поставленной задачи, включающий ряд этапов:

1) построить модель сети процессов ОАО «Керамин», необходимых СМК в состоянии «как есть», определить ресурсы, ответственность и полномочия, документацию;

2) выделить в модели процессы, необходимые системе менеджмента измерений (процессы метрологического обеспечения производства)

3) проанализировать источники несоответствий структуры, процессов, ресурсов метрологической службы;

4) построить комплексную модель системы менеджмента измерений в состоянии «как надо», включающую:

– модель процессов метрологического обеспечения,

– модель структуры метрологической службы, гармонизированной с моделью процессов метрологического обеспечения,

– модель ресурсного обеспечения (инфраструктура, персонал, производственная среда),

– модель сбора и анализа данных о результативности метрологического обеспечения и принятия управленческих решений,

5) разработать комплекс документации системы менеджмента измерений по критерию необходимости и достаточности, включая разработку процедуры планирования, обеспечения, управления и совершенствования единичного метода измерений, контроля и испытаний (системы измерений) в рамках системы менеджмента измерений.

Согласно требованиям СТБ ИСО 10012, для обеспечения соответствия метрологических характеристик измерительного оборудования метрологическим требованиям, установленным для процесса измерений, должна быть разработана программа и проведено метрологическое подтверждение пригодности применяемого на предприятии измерительного оборудования.

Метрологическое подтверждение пригодности включает калибровку и верификацию измерительного оборудования.

Процессы измерений, которые являются частью системы управления измерениями, должны

быть спланированы, утверждены, выполнены, документированы и должны управляться. Должны быть идентифицированы влияющие величины и учтено их воздействие на процессы измерений [2].

Предполагается, что разработка и внедрение системы менеджмента измерений в ОАО «Керамин» позволит достичь следующих результатов:

1) повышение достоверности результатов измерений на всех стадиях жизненного цикла продукции, а соответственно, сокращение издержек за счет минимизации несоответствующей продукции, как на промежуточных производственных этапах, так и на конечном этапе производства (внутренний брак), а также уже реализованной продукции (внешний брак), и как следствие, повышение доверия потребителей к качеству продукции;

2) повышение эффективности метрологического обеспечения производства и повышение

конкурентоспособности продукции ОАО «Керамин»;

3) оптимизация парка измерительного оборудования.

Таким образом, внедрение систем менеджмента измерений на производственных предприятиях Республики Беларусь является перспективным направлением.

### Литература

1. СТБ ИСО 10012-2004 «Системы управления измерениями. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию».

2. ГОСТ Р ИСО 10012-2008 «Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию».

3. СТБ 2450-2016 «Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем».

УДК 621.791

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛАБОРАТОРИИ

Серенков П.С., Дубицкий Д.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Обеспечение прослеживаемости результатов измерений является необходимым условием метрологической сопоставимости результатов измерений [1]. Следует отметить, что прослеживаемость результатов измерений, а, следовательно, и метрологическая сопоставимость результатов измерений, определена в принципах обеспечения единства измерений и статьях Закона об обеспечении единства измерений Республики Беларусь:

– приоритетное применение единиц измерений Международной системы единиц;

– применение национальных эталонов единиц величин;

– прослеживаемость результатов измерений до единиц измерений Международной системы единиц (рисунок 1), воспроизводимых национальными эталонами единиц величин и (или) международными эталонами единиц величин.



Рисунок 1 – Прослеживаемость результатов измерений до единиц СИ

Сопоставимость измерений является наиважнейшей характеристикой международной системы измерений, в рамках которой результаты измерений признаются в мировом масштабе [2]. Эта международная состоятельность и сопоставимость может быть гарантирована, если результаты измерений прослеживаются до международно признанных эталонов. В целом, эти эталоны составляют основу международной системой единиц (СИ). Но, в тех случаях, когда подобное недостижимо в настоящий момент, то результаты измерений должны быть прослеживаемы к другим международно согласованным эталонам (например, шкалы твердости и исходные эталоны, установленные ВОЗ). Прослеживаемость позволяет различным странам признавать результаты измерений, выполненные в различное время и различными лабораториями, тем самым позволяя избежать технических барьеров в торговле, и, следовательно, экономических потерь.

Таким образом, прослеживаемость результатов измерений, с одной стороны, является ключевым элементом обеспечения единства измерений в стране, с другой стороны – средством устранения технических барьеров в торговле.

Именно поэтому вопросу обеспечения прослеживаемости результатов измерений в настоящий момент уделяется большое внимание.

В докладе приведены политики по обеспечению прослеживаемости результатов измерений и произведён их сравнительный анализ, который

показал, что большинством стран мира были разработаны политики в соответствии с требованиями Политики ИЛАС. Однако вопрос подтверждения (доказательная основа) обеспечения прослеживаемости результатов измерений до сих пор остаётся открытым.

В силу этого, была сформулирована задача разработки комплексного подхода к обеспечению прослеживаемости результатов измерений, который, с одной стороны, учитывал бы особенности законодательства Республики Беларусь в области обеспечения единства измерений, с другой, – отвечал требованиям международных документов.

В докладе приведено решение комплекса задач нормативно-методического и метрологического обеспечения, который включает в себя разработку методологической основы обеспечения качества деятельности лаборатории в рамках комплексного подхода к обеспечению прослеживаемости результатов измерений.

На начальном этапе работы был осуществлён сравнительный анализ политик по прослеживаемости БГЦА и ИЛАС, который позволил определить области (случаи), не охваченные политикой БГЦА (рисунок 2).

Для представленных случаев (выделены красным цветом) политикой ИЛАС установлены свидетельства прослеживаемости результатов измерений (далее – свидетельства).

Следующий этап работы – экспертное оценивание уровня риска свидетельств, которое необходимо для определения степени значимости данных свидетельств. Значимость свидетельств указывает на потенциальную опасность невыполнения/ненадлежащего выполнения требований ISO/IEC 17025 в отношении конкретного свидетельства. Были выставлены оценки уровня риска свидетельств от низкого уровня до высокого. Оценивание осуществлялось ведущими экспертами БелГИМ с учетом их компетенции и опыта работы.

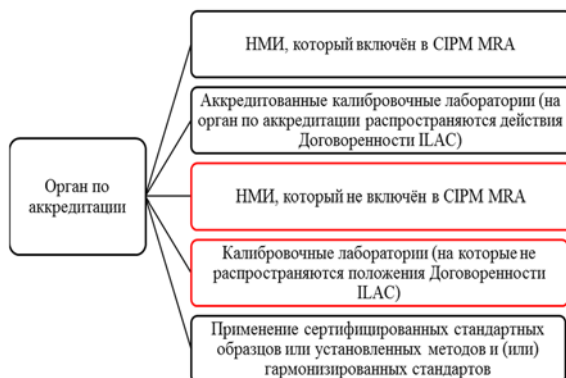


Рисунок 2 – Случаи признания обеспечения метрологической прослеживаемости согласно политике ИЛАС

Свидетельства были разделены на 2 группы (рисунок 3) – собственно метрологическая про-

слеживаемость и лабораторная прослеживаемость. Число составляющих прослеживаемости результатов измерений было обосновано с позиций стандарта СТБ ИСО 5725-2.



Рисунок 3 – Прослеживаемость результатов измерений в соответствии с Политикой ИЛАС

Разработан комплексный подход к обеспечению прослеживаемости результатов измерений, включающий в себя методику оценивания свидетельств прослеживаемости результатов измерений, позволяющую определить степень выполнения (наличие) свидетельств в данной лаборатории. Данный подход включает следующие этапы реализации:

- 1) формирование цели и задач исследования;
- 2) формирование группы управления проведения оценивания;
- 3) выбор метода получения экспертной информации и способов ее обработки;
- 4) подбор группы экспертов и создание опросных листов (анкет);
- 5) опрос экспертов;
- 6) обработка и анализ результатов опроса с учётом коэффициентов весомости;
- 7) интерпретация результатов и принятие управляющего решения (рисунок 4).

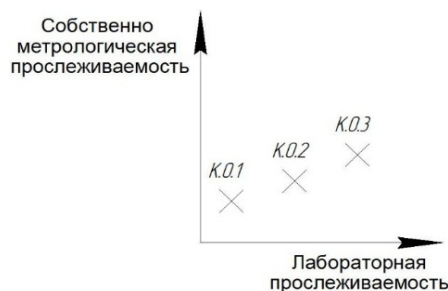


Рисунок 4 – Пример интерпретации результатов экспертного оценивания

Применение комплексного подхода с целью выявления и устранения источников неопределённости, оказывающих негативное влияние на свидетельства прослеживаемости, фактически обеспечивает выполнение цикла PDCA и принципа постоянного улучшения СТБ ISO 9001 в лаборатории.

Применение комплексного подхода к обеспечению прослеживаемости результатов измерений, в зависимости от уровня, имеет три основных положительных эффекта:

1) государственный уровень – позволяет обеспечивать прослеживаемость результатов измерений в случаях, неговоренных Политикой БГЦА, но, определяемых Политикой ИЛАС.

2) лабораторный уровень (экономический эффект) – позволяет осуществлять постоянный мониторинг процессов деятельности лаборатории (снижение рисков в результате корректирующих и предупреждающих действий);

3) уровень потребителя – гарантированное получение продукции и услуг высокого качества.

## Литература

1. IUPAC Technical Report Pure Appl. Chem., Vol. 83, No. 10, pp. 1873–1935, 2011. Metrological traceability of measurement results in chemistry: concepts and implementation ([www.iupac.org](http://www.iupac.org)).

2. Совместная ВРМ, OIML, ИЛАС и ISO декларация по метрологической прослеживаемости 9 ноября 2011. [Электронный ресурс]: Киев, 2014 г. URL: [http://aac-analitica.ru/files/ILAC\\_doc/sovmevnaya\\_deklaraciya.pdf](http://aac-analitica.ru/files/ILAC_doc/sovmevnaya_deklaraciya.pdf) (дата обращения: 02.10.2017).

УДК 519.2:006

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АККРЕДИТАЦИИ ПРОВАЙДЕРОВ ПРОВЕРКИ КВАЛИФИКАЦИИ ЛАБОРАТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ Кондратович А.Н.<sup>1</sup>, Серенков П.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный центр аккредитации, Минск, Республика Беларусь

Один из наиболее важных вопросов в сфере оценки соответствия в настоящее время – это обеспечение качества выполнения лабораториями калибровки средств измерений и испытаний для обеспечения получения достоверных сведений о соответствии либо несоответствии продукции установленным требованиям.

В современном мире в качестве инструмента для подтверждения компетентности лабораторий и обеспечения достоверности испытаний и калибровки выступает аккредитация. При аккредитации используется несколько подходов для подтверждения компетентности, одним из которых является оценка результатов участия лабораторий в программах проверки квалификации и межлабораторных сличениях.

В международной практике деятельность провайдеров проверки квалификации (далее – провайдеров) не регулируется государством, а необходимость наличия аккредитованного провайдера в той или иной сфере деятельности определяется потребностью рынка. В Евразийском экономическом союзе (далее – ЕАЭС) и в Республике Беларусь, в частности, в соответствии с Решением Коллегии ЕАЭС от 26 января 2016 г. № 12 «Об утверждении Порядка организации проведения межлабораторных сравнительных испытаний» [1] программы проверки квалификации проводятся провайдерами, уполномоченными или аккредитованными в порядке, установленном законодательством государств-членов ЕАЭС. В регулируемой сфере (испытания на соответствие требованиям технических регламентов ЕАЭС) в Республике Беларусь используется институт уполномочивания. [2]

Однако орган по аккредитации в настоящее время активно работает над внедрением нового вида деятельности – аккредитация провайдеров.

Так как аккредитация провайдеров является новым видом деятельности для органа по аккредитации, орган по аккредитации должен разработать процедуры для аккредитации в новой сфере. В соответствии с п. 4.6 СТБ ISO/IEC 17011 [3] элементами таких процедур могут быть:

а) анализ своей компетентности, готовности к освоению дополнительной области своей деятельности, достаточность ресурсов для выполнения функций в новой области;

б) анализ и применение экспертизы внешними исполнителями;

в) определение потребности в применении руководящих документов, определяющих деятельность органа по аккредитации;

г) первоначальный подбор и обучение экспертов;

д) обучение штатных работников органа по аккредитации в новой области деятельности.

В качестве правовой базы и документа, который регламентирует процедуры и вопросы аккредитации органов по оценке соответствия, используются Правила аккредитации [4], которые в настоящее время предусматривают процедуры аккредитации провайдеров.

Первостепенной задачей органа по аккредитации является определение технического нормативного правового акта (далее – ТНПА), устанавливающего требования к заявителям на аккредитацию, – основополагающего стандарта.

В Республике Беларусь в настоящее время действует два ТНПА, устанавливающих требования к проведению программ проверок квалификации с использованием межлабораторных сличений:

– СТБ 941.6-2000 «Система аккредитации Республики Беларусь. Межлабораторные сличения. Требования к программам, порядку их реализации» [5];



– ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации» [6].

Для определения основополагающего стандарта необходимо принять во внимание развитие настоящих ТНПА, которое изображено на рисунке 1.

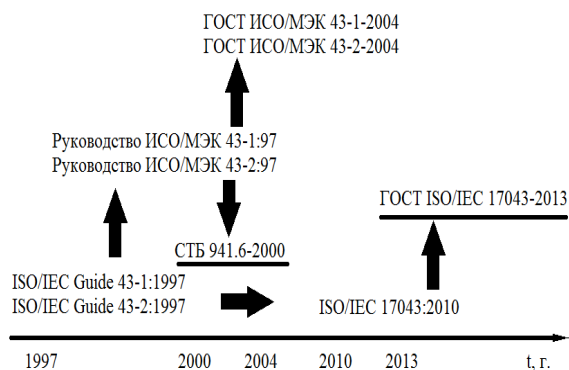


Рисунок 1 – Развитие стандартов, устанавливающих требования к проведению программ программ проверок квалификации

Из представленной схемы, сравнивая даты издания стандартов СТБ 941.6 и ГОСТ ISO/IEC 17043 и их эволюцию, становится очевидно, что в качестве основополагающего стандарта для осуществления аккредитации провайдеров необходимо выбрать самый современный стандарт на сегодняшний день – ГОСТ ISO/IEC 17043.

Не менее важной задачей органа по аккредитации является оценка ресурсов для выполнения аккредитации провайдеров, в том числе наличие экспертов по аккредитации, технических экспертов по аккредитации, оценка их знаний и навыков по определению технической компетентности провайдеров (их умения определять приписанное значение, проводить статистический анализ, оценивать характеристики функционирования, определять однородность и стабильность образцов для проверки квалификации).

Органу по аккредитации на базе добровольного участия заинтересованных сторон, представителей органа по аккредитации и базовых организаций необходимо создать технический комитет провайдеров для:

- обеспечения оценки компетентности технических экспертов по аккредитации с целью подтверждения их технической компетентности и присвоения технических кодов;
- разработки методических рекомендаций по вопросам, связанным с аккредитацией провайдеров;

– подготовки в требуемых случаях рекомендаций органу по аккредитации в отношении принимаемых решений, касающихся аккредитации провайдеров.

Для однозначного понимания и применения порядка проведения аккредитации провайдеров экспертами и заявителями на аккредитацию, органу по аккредитации необходимо внести изменения во внутренние процедуры и рабочие инструкции, политику по установлению критериев аккредитации, а также издать политику в отношении аккредитации провайдеров проверки квалификации.

В докладе уделено особое внимание научно-методическим аспектам обеспечения объективности процедур проверок квалификации лабораторий:

- анализу критериев, определяющих положительный результат проверки квалификации требованиям,
- анализу адекватности форм организации проверок квалификации критериям соответствия лабораторий требованиям,
- анализу корректности статистических процедур, характеристик и критериев с точки зрения объективности представления лабораторией своих возможностей.
- анализу необходимости и достаточности регулирования деятельности провайдеров по проверкам квалификации.

### Литература

1. Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 26 января 2016 г. № 12 «Об утверждении Порядка организации проведения межлабораторных сравнительных испытаний».
2. Приказ Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь «О назначении БелГИМ уполномоченным органом» от 08.02.2018 №19.
3. СТБ ISO/IEC 17011-2008 «Оценка соответствия. Требования к органам по аккредитации органов по оценке соответствия».
4. Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь «Об утверждении Правил аккредитации» от 31 мая 2011 г. № 27 с изм. от 19 июня 2017 г. № 49.
5. СТБ 941.6-2000 «Система аккредитации Республики Беларусь. Межлабораторные сличения. Требования к программам, порядку их реализации».
6. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации».

УДК 519.2:006

## РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНЫХ РАБОТ

Серенков П.С.<sup>1</sup>, Гуревич В.Л.<sup>2</sup>, Мовламов В.Р.<sup>2</sup>, Етумян А.С.<sup>3</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>ФГБУ научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России  
Балашиха, Российская Федерация

В Республике Беларусь в области строительства зданий и сооружений все большее внимание, на сегодня, уделяется обеспечению огнезащиты строительных конструкций (далее – СК) [1]. Существует значительное количество организаций, имеющих лицензию на осуществление деятельности по обеспечению огнезащитой СК. Огнезащита СК является одним из средств обеспечения пожарной безопасности строительных объектов.

Ежегодно общая площадь строительных конструкций, подвергаемых обработке огнезащитными материалами, составляет более миллиона квадратных метров (в том числе СК подвергаемые повторной обработке). В связи с этим качество огнезащитных работ по нанесению огнезащитного покрытия на строительных объектах не всегда соответствует установленным требованиям. Причиной же являются:

- непосредственно получение подрядчиками максимальной прибыли;
- несоответствующий уровень подготовки специалистов занимающихся огнезащитной обработкой;
- замена огнезащитных составов на более дешевые аналоги или краски, не выполняющие функции огнезащиты, при отсутствии визуальных отличий покрытия;
- низкое качество подготовки поверхностей конструкций, подвергаемых огнезащитной обработке, что в той или иной степени ухудшает адгезионные свойства огнезащитных покрытий;
- отсутствие методов и средств неразрушающего контроля, где основной целью неразрушающего контроля является получение объективной информации о виде огнезащитного состава, о толщине огнезащитного покрытия и о качестве проведенных огнезащитных работ в целом.

Следует отметить, что несоблюдение требований при проведении огнезащитных работ влечет за собой снижение огнестойкости обработанных СК, и при возникновении пожара, нагрузок, вследствие высоких температур, происходит быстрое их обрушение [2], [3]. В отдельных случаях потеря несущей способности одного элемента СК может привести к обрушению всего строительного объекта. Поэтому, на сегодняшний день, очень высоки требования к огнезащите строительных объектов и для предотвращения подобных нарушений необходим контроль качества огнезащитных работ.

Процесс обеспечения контроль качества огнезащитных работ представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Процесс обеспечения контроль качества огнезащитных работ

Качество огнезащитных работ определяется путем экспертного оценивания. Так техническим комитетом по стандартизации ТК ВУ 35 «Средства обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения. Требования в области обеспечения пожарной безопасности» (далее – ТК 35) определены два основных параметра характеризующих качество огнезащитных работ (рисунок 2).



Рисунок 2 – Параметры качества огнезащитных работ

Идентификация огнезащитного материала и контроль толщины огнезащитного покрытия – это два принципиально-отличающихся направления при осуществлении контроля, т. к. в первом случае проводится идентификация огнезащитного материала как «свой-чужой» по альтернативному признаку, во втором случае проводится контроль именно толщины покрытия.

В настоящее время контроль качества огнезащитных работ методологически не проработан, поэтому возникла необходимость разработки методики контроля с учетом высоких рисков, связанных с некорректным принятием решений

по результатам контроля. В частности, некорректная идентификация огнезащитного материала (состава) и недостоверного контроля толщины огнезащитного покрытия.

Для разработки методик контроля следует подходить с позиции интегрального риска контроля качества, который включает риски первого и второго рода (рисунок 3).

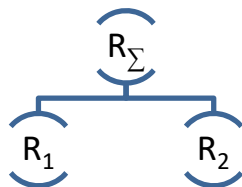


Рисунок 3 – Модель рисков контроля качества огнезащитных работ

Риски первого рода  $R_1$  связаны с некорректностью результатов контроля в одной точке элемента СК.

Риски второго рода  $R_2$  связаны с не репрезентативностью выборочного контроля всей поверхности СК и строительного объекта в целом. Данная ситуация неизбежно возникает, когда отсутствуют рекомендации по выбору количества и расположения контрольных точек на объектах контроля, и принятию решений о соответствии объектов контроля.

Для идентификации источников рисков следует применить риск-ориентированный подход к разработке методики контроля толщины огнезащитного покрытия и идентификации огнезащитного материала, предполагающий рассмотрение на базе процессной модели контроля СК всех возможных потенциальных проблем, которые могут вызвать риск некорректного принятия решения [4]. Следует отметить, что источники возникновения рисков первого и второго рода будут отличны друг от друга при разработке методики контроля толщины огнезащитного покрытия и идентификации огнезащитного материала.

Методика контроля толщины огнезащитного покрытия с позиции риск-ориентированного

подхода, представленная в работе [5], внедрена в процедуры контроля огнезащитных работ НИИ ПБ и ЧС Республики Беларусь и организации занимающимися нанесением и контролем огнезащитного покрытия, а также включена в структуру проекта государственного стандарта «Контроль качества огнезащитных работ. Общие технические требования. Методы проведения».

Вопрос об идентификации огнезащитного материала остается открытым и не проработанным, отсюда задачей НИИР стало – обоснование подхода и разработка методики идентификации огнезащитного состава нанесенного на поверхность СК с учетом обеспечения заданного риска.

Для идентификации источников рисков, следует по аналогии с подходом описанным [5], разработать вероятностную модель рисков, возникающих при идентификации огнезащитного состава. С помощью такой модели, мы рассмотрим влияние всех возможных источников рисков, а также пути их минимизации.

### Литература

1. Собрать С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Учебно-справочное пособие / С.В. Собрать. – 3-е изд. (с изм.) – М. : ПожКнига, 2004. – 240 с.
2. Gian-Luca F. Porcari, Ehab Zalok, Waleed Mekky Fire induced progressive collapse of steel building constructions: A review of the mechanisms / Engineering Constructions Volume 82. – 2015. – pp. 261–267.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман. – Москва : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». – 2001. – 382 с.
4. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements.
5. Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля / П.С. Серенков [и др.] // Приборы и методы измерений : научно-технический журнал. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 155–166.

УДК 699.81:519.2:006

### МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОГНЕЗАЩИТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Серенков П.С.<sup>1</sup>, Гуревич В.Л.<sup>2</sup>, Мовламов В.Р.<sup>2</sup>, Етумян А.С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ФГБУ научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России  
Балашиха, Российская Федерация

Для снижения пожарной опасности и обеспечения требуемой огнестойкости строительных конструкций (далее – СК) применяются специальные огнезащитные составы, предназначенные

для повышения пределов огнестойкости СК при воздействии огня.

Строительные объекты, подвергаемые обработке огнезащитными составами впервые или

повторно, ежегодно возрастает, и в связи с этим появляются требования к качеству выполняемых работ по огнезащитной обработке СК.

Техническим комитетом по стандартизации ТК ВУ 35 «Средства обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения. Требования в области обеспечения пожарной безопасности» установлены основные параметры определяющие качество огнезащитных работ, а именно контроль толщины огнезащитного покрытия и идентификация огнезащитного состава. В докладе рассмотрены вопросы разработки методики идентификации огнезащитного состава с учетом возможных источников риска, с учетом наработок по риск-ориентированному подходу к созданию методик контроля характеристик огнестойкости СК. [1]

В настоящее время в Республике Беларусь существует значительное количество огнезащитных составов, как отечественного, так и зарубежного производства. Основной проблемой применения этих составов является то, что недобросовестные поставщики, занимающиеся производством, подменяют их на более дешевые аналоги (некачественные огнезащитные составы), либо составы, не выполняющие функции огнезащиты, т. е. не соответствующие прямому их назначению.

Поэтому для исключения появления такого риска, ТК ВУ 35 определил необходимость разработки методики контроля, а именно идентификации огнезащитного состава, как приоритетное направление НИР с учетом высоких рисков, связанных с некорректным принятием решений по результатам контроля.

Основная задача НИР – обоснование подхода и разработка методики идентификации огнезащитного состава, нанесенного на поверхность элементов СК.

Для обоснования подхода разработана модель декомпозиции рисков получения недостоверных результатов контроля, которая предполагает наличие двух типов рисков: риск первого и второго рода (рисунок 1).

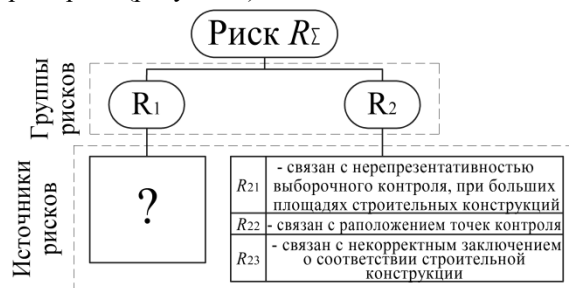


Рисунок 1 – Модель декомпозиции рисков

Данная модель разработана в соответствии с риск-ориентированным подходом к разработке методик контроля в этой области [2]. Это обеспечивает реализацию комплексного подхода к разработке методики контроля, включая используемое измерительное оборудование, план контроля, расположение точек проведения контроля и т. д.

Риски первого рода  $R_1$  связаны с некорректностью результатов контроля в единичной точке элемента СК, когда по результатам измерений формируется решение о соответствии заявленного огнезащитного состава в точке контроля.

Риски второго рода  $R_2$  связаны с нерепрезентативностью выборочного контроля СК. Очевидно, что план контроля (тип плана, количество и расположение точек контроля, браковочное число) не гарантирует абсолютной корректности принятия решения о соответствии (несоответствии) всего объекта.

На основании анализа процесса идентификации состава, методологически были проработаны вопросы минимизации рисков второго рода [1]. В докладе основной акцент сделан на рассмотрении вопросов идентификации огнезащитного состава в единичной точке контроля и связанных с этим источниках рисков.

Идентификации огнезащитного состава является качественным показателем и для выявления возможных источников риска была сформирована модель процесса контроля, представленная на рисунке 2.

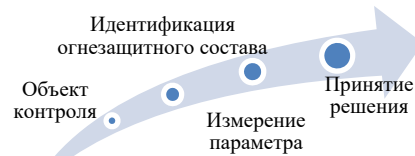


Рисунок 2 – Процессная модель контроля огнезащитного состава

В качестве объекта контроля служит огнезащитный состав, нанесенный на поверхность СК. Измерение параметра проводится с помощью специального измерительного оборудования, после чего идет процесс идентификации, заключающийся в определении огнезащитного состава как «свой-чужой». Следует отметить, что процесс идентификации имеет специфичный характер, смысл которого заключается в оценивании параметра по альтернативному признаку посредством косвенных измерений, что создает дополнительные источники появления интегрального риска недостоверного контроля.

Далее по итогам идентификации принимается решение о соответствии или не соответствии огнезащитного состава заявленному типу в технической документации.

В докладе определены частные риски, возникающие на этапе идентификации огнезащитного состава и их источники.

Для идентификации источников рисков мы применили системный подход предполагающий рассмотрение на базе процессной модели контроля СК всех возможных потенциальных проблем, которые могут вызвать риск некорректного принятия решения [2] разработана двухуровневая вероятностная модель рисков (рис. 1), возникающих при идентификации огнезащитного состава.

Первый из источников риска, возникающий при осуществлении идентификации, – это риск, связанный с методической ошибкой косвенных измерений, используемых для идентификации.

До недавнего времени идентификация состава проводилась по результатам лабораторных испытаний отобранных образцов, полученных путем выпиливания из СК, скобления с поверхности, обработанной огнезащитными материалами СК. Фактически был реализован разрушающий метод контроля, нарушающий цельность СК.

Для минимизации данного источника риска Научно-исследовательским институтом пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь и Военной Академии Республики Беларусь разработан диэлькометрический метод оперативного контроля, который основан на измерении электрофизических параметров обработанных поверхностей СК без нарушения целостности огнезащитного покрытия.

Второй по важности источник риска возникает из-за замены огнезащитных составов на более дешевые аналоги или краски, не выполняющие функции огнезащиты.

Для минимизации данного источника риска было предложено использовать метод «эталона-

свидетеля». Эталон-свидетель обладает теми же свойствами, что и покрытие, нанесенное на объекты СК. Он позволяет контролирующим органам, через сличение результатов измерений диэлькометрическим методом убедиться в том, что на поверхности СК нанесен огнезащитный состав, соответствующий требованиям.

Третий по важности источник риска связан с вероятностью некорректного заключения о соответствии огнезащитного состава установленным требованиям, ассоциируемой с рисками поставщика  $\alpha$  и потребителя  $\beta$ , возникающими при контроле.

Вопрос об идентификации огнезащитного состава остается открытым и для выявления дополнительных источников риска и поиска путей их минимизации необходимо проведение дополнительных исследований.

#### Литература

1. Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля / П.С. Серенков [и др.] // Приборы и методы измерений: научно-технический журнал. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 155–166.

2. СТБ ISO 9001-2015 «Система менеджмента качества. Требования».

УДК 621.791

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ Серенков П.С.<sup>1</sup>, Романчак В.М.<sup>1</sup>, Сацкевич А.А.<sup>1</sup>, Басинюк В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Для инновационных технологий получения новых материалов, покрытий, конструкции и т. д. процесс проектирования и разработки является ключевым этапом их жизненного цикла, в рамках которого возможно реализовать наилучшее сочетание «затраты – наилучший комплекс функциональных характеристик».

Спецификой данного процесса в первую очередь является низкая информативность об объекте исследования и невозможность применения метода аналогов и прецедентов. Из-за отсутствия необходимого количества информации возрастает риск принятия некорректного решения.

К тому же инновационная деятельность является сферой колоссальных финансовых затрат, о чем можно утверждать исходя из официальной статистической информации [1]. В результате чего исследователи, как правило, проводят лишь частичные экспериментальные исследования, что в свою очередь является причиной возникновения рисков:

– недостижения оптимальных характеристик исследуемой инновационной технологии;

– неготовности разработанной инновации к практической реализации.

С учетом всех выявленных проблемных областей была разработана стратегия эффективной разработки инновационных материалов и покрытий в области машиностроения, реализуемая в три последовательных этапа:

– Этап 1. Идентификация и формализация целей;

– Этап 2. Выбор приоритетной инновационной технологии;

– Этап 3. Проработка параметров приоритетной инновационной технологии.

В докладе подробно изложен порядок реализации второго этапа стратегии, а также приведены данные, полученные при практической апробации.

Наибольший интерес с научной точки зрения вызывает второй этап. Для корректного выбора приоритетного варианта разрабатываемого инновационного продукта в первую очередь необходимо описать технологию как процесс, а именно разработать укрупненную модель будущего технологического процесса, состоящего из конечного множества основных этапов ( $a, b, \dots$ ).

Затем следует провести морфологический анализ технологического процесса, то есть сформулировать множества всех возможных вариантов (методов) реализации каждого этапа, например,  $(a_1, a_2, a_3, \dots; b_1, b_2, b_3, \dots; \dots)$ , и сформировать «морфологический ящик» всех возможных комбинаций (рисунок 1).

$$\begin{matrix} a_1b_1; a_1b_2; a_1b_3 \\ a_2b_1; a_2b_2; a_2b_3 \\ a_3b_1; a_3b_2; a_3b_3 \end{matrix}$$

Рисунок 1 – Морфологический анализ технологического процесса, состоящего из двух этапов и трех вариантов реализации каждого этапа

Далее возникает задача выбора наилучшего сочетания этапов процесса. Предложены два пути ее решения:

– разделить задачу и первоначально по результатам ранжирования выбрать наилучший вариант (метод) реализации первого этапа, второго и т.д., а затем сформировать искомую технологию путем сочетания выбранных наилучших вариантов (методов);

– решать задачу комплексно, ранжируя технологии как совокупность вариантов (методов реализации) каждого этапа процесса.

Определено, что задачу следует решать комплексно в виду того что варианты (методы) реализации каждого этапа потенциально могут быть взаимосвязаны.

Рассмотрены три способа комплексного ранжирования технологий:

1. Выбор приоритетной инновационной технологии методом альтернатив [2] (рисунок 2).

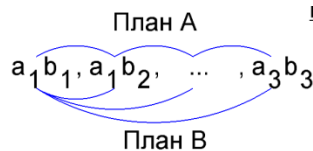


Рисунок 2 – Графическая интерпретация метода альтернатив

Метод альтернатив предполагает попарное сравнение ранжированного ряда технологий по плану А – «каждый с предыдущим» и по плану В – «первый с каждым». При выборе приоритетной инновационной технологии методом альтернатив получаемые экспертные оценки не обладают необходимой точностью и достоверностью. Так как при попарном сравнении рандомизированного ряда технологий встречаются сочетания, в которых одновременно меняются 2 и более варианта (метода) реализации каждого этапа, что приводит к увеличению персональной вариации мнений каждого эксперта, вследствие чего доверие к экспертным оценкам падает.

2. Выбор приоритетной инновационной технологии методом покоординатного спуска [3].

Данный метод в отличие от предыдущего гарантирует попарное сравнение двух вариантов

технологий, отличающихся только одним вариантом (методом) реализации каждого этапа. По условным линиям формируются сочетания (технологии), а попарное сравнение осуществляется между двумя технологиями, выходящими из одной точки (вариант этапа) (рисунки 3 и 4).

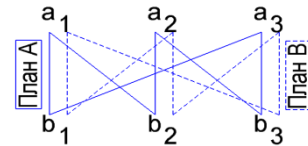


Рисунок 3 – Графическая интерпретация метод покоординатного спуска. План А по пунктирным линиям; план В по основным линиям

|        |          |          |          |          |          |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| План В | $a_1b_1$ | $a_2b_1$ | $a_2b_2$ | $a_3b_2$ | $a_3b_3$ |
|        | $a_2b_1$ | $a_2b_2$ | $a_3b_2$ | $a_3b_3$ | $a_1b_3$ |
| План А | $a_1b_1$ | $a_1b_2$ | $a_2b_2$ | $a_2b_3$ | $a_3b_3$ |
|        | $a_1b_2$ | $a_2b_2$ | $a_2b_3$ | $a_3b_3$ | $a_3b_1$ |

Рисунок 4 – Матрица оценивания приоритетности технологий по методу покоординатного спуска

При этом данный метод предполагает сравнение по двум альтернативным планам (рисунок 3): попарное сравнение вариантов «вдоль пунктирной линии» (план А) и попарное сравнение по движению «вдоль основной линии» (план В). Отметим, что по вертикальным линиям возникают контрольные сочетания (технологии), в которых появляется возможность проверки достоверности и точности экспертных оценок с помощью статистических критериев.

Применение данного метода ограничивается количеством потенциальных технологий: при небольшом количестве возможных сочетаний вариантов разрабатываемых технологий «точек контроля» (контрольных сочетаний) недостаточно для применения статистических критериев проверки достоверности оценок.

3. Выбор приоритетной инновационной технологии комбинированным методом.

Каждый из двух рассмотренных методов обладают достоинствами и недостатками. Обоснован комбинированный метод, предполагающий сравнение по двум альтернативным планам: попарное сравнение вариантов «вдоль пунктирной линии» (план А) и попарное сравнение по движению «вдоль основной линии» (план В) (рисунок 5).

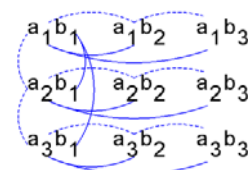


Рисунок 5 – Графическая интерпретация комбинированного метода. План А – по пунктирным линиям; план В – по основным линиям

Комбинированный метод обладает преимуществами первых двух рассмотренных методов и компенсирует их недостатки.



Рисунок 6 – Организация опроса группы экспертов

По мере реализации комбинированного метода необходимо проверить согласованность мнений группы экспертов, используя статистические

критерии и осуществляя проверку в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 6.

### Литература

1. Медведева И.В. Наука и инновационная деятельность в Республике Беларусь / И.В. Медведева. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2017. – С. 506.
2. Серенков П.С. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации: учеб. пособие / П.С. Серенков [и др.]. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2014. – 256 с.
3. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Спирин Н.А., Лавров В.В. // Екатеринбург, 2004 – С. 195–208.

УДК 621.791

## СТРАТЕГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ КОМПЛЕКСА ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ Серенков П.С., Рудницкий Ф.И., Сацукевич А.А., Романчук В.М.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

С целью обеспечения эффективной разработки инновационных материалов и покрытий в области машиностроения с одной стороны требуется достаточно высокий уровень доверия к результатам исследований, позволяющий минимизировать риски некорректных решений. С другой стороны, разработка инновационных технологий является ресурсоемким процессом, требующим значительных финансовых вложений [1], вследствие чего возникает задача сокращения количества испытаний и минимизации затрат на их проведение.

Решить данное техническое противоречие возможно путем организации предварительной стадии эксперимента, на основе экспертных оценок, с целью поиска оптимальной области дальнейших экспериментальных исследований.

В настоящее время исследования инновационных технологий осуществляются, как правило, методами планирования эксперимента. Преимущества использования методов планирования эксперимента:

- 1) организация работы исследователя;
- 2) принятие обоснованных решений на основе обработки экспериментальных данных с помощью статистических критериев;
- 4) минимизация ошибок эксперимента за счет использования специальных проверок;
- 5) одинаковое значение дисперсии предсказанных значений отклика во всем факторном пространстве.

При планировании эксперимента реализуется процедура выбора условий проведения опытов и

их количества, необходимых и достаточных для решения задачи с поставленной точностью. То есть принятие решений в рамках теории планирования эксперимента осуществляется на основе данных полученных экспериментальным путем.

Применение экспертных оценок на основе теории планирования эксперимента в качестве альтернативы экспериментальным исследованиям позволит значительно (в разы) сократить техническую, наиболее затратную часть испытаний (оборудование, условия и т. п.).

С учетом всех выявленных особенностей была разработана стратегия эффективной разработки инновационных материалов и покрытий в области машиностроения, реализуемая в три последовательных этапа:

- Этап 1. Идентификация и формализация целей;
- Этап 2. Выбор приоритетной инновационной технологии;
- Этап 3. Проработка параметров приоритетной инновационной технологии.

В докладе подробно изложен порядок реализации первого этапа стратегии, а также приведены данные, полученные при практической апробации данного этапа на проекте НИЛ «Литейные технологии» БНТУ по выбору способа литья из быстрорежущей стали.

На первом этапе необходимо идентифицировать и сформулировать цель исследования, а также определить ее целевое значение. Виды целевых функций в соответствии с теорией Г. Тагути:

1. «Лучше всего – номинал»  $\in [A_{min}; A_{max}]$ .  
Надо стремиться к номиналу с минимальной вариабельностью.

2. «Чем меньше – тем лучше»  $A \leq [A_{max}]$ .  
Необходимо минимизировать выходные параметры.

3. «Чем больше – тем лучше»  $A \geq [A_{min}]$ .  
Необходимо максимизировать выходные параметры.

4. Дискретный показатель «атрибут», используемый для классификации или подсчета.

5. Динамическая характеристика, величина которой зависит от входных данных.

Исследования и разработка инновационной технологии может осуществляться с целью:

- априори ее создания (цель одна);
- создания универсальной инновационной технологии, обладающей множеством свойств (комплекс целей).

В случае, когда исследователь преследует комплекс целей, на данном этапе главным является ранжирование полученного комплекса.

В настоящее время задачи ранжирования свойств (целей, объектов и т. д.) решают методами квалиметрии. В работе [2] на основании комплексных исследований процесса экспертного оценивания с помощью метода Т. Саати, являющегося в классической квалиметрии одним из наиболее объективных методов сбора и анализа экспертной информации [3], было доказано, что методы квалиметрии не предоставляют требуемый уровень доверия из-за наличия двух источников несогласованности мнений экспертов: групповой вариацией мнений экспертов (разногласий в группе) [4] и персональной вариацией мнений отдельно взятого эксперта.

В работе [2] был предложен и экспериментально проверен другой «способ измерения предпочтений эксперта в интервальной шкале», так называемый метод альтернатив, позволяющий минимизировать доминирующую персональную вариацию мнений одного эксперта.

Предлагаемый метод альтернатив, как способ оценивания функции полезности, основан на оценке разностей между двумя рассматриваемыми факторами (свойствами, технологиями и т. д.) по шкале Т.Саати. Оценивания реализуется по двум различным планам типа «каждый с каждым» и «каждый с одним». Затем полученные на основании систем уравнений оценки факторов (свойств, технологий и т. д.) должны быть проверены на устойчивость. Экспертные оценки считаются устойчивыми, если альтернативные оценки связаны статистически значимой адекватной возрастающей линейной зависимостью.

Для решения задачи ранжирования комплекса целей разработки инновационной технологии был выбран метод альтернатив (рисунок 1).

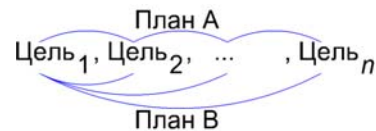


Рисунок 1 – Схема реализации эксперимента по методу альтернатив

После получения ранжированного ряда целей и дополнительного его согласования необходимо повторно применить метод альтернатив с целью уточнения оценок свойств в шкале интервалов. Необходимость осуществления повторной процедуры связана с тем, что первоначально свойства располагаются в случайном порядке, а при таком способе предъявления непротиворечивость эксперта с самим собой довольно высока.

В рамках проекта по выбору способа литья было выявлено, что будущая инновационная технология должна обладать рядом свойств: технологичность, структура заготовки, «проливаемость» длинной заготовки, геометрические параметры в поперечном и продольном сечениях, экономичность, экологичность, которые по результату анкетирования в два этапа были проанализированы (шкала рангов) и оценены (шкала интервалов) в баллах.

Далее после получения бальных оценок комплекса целей в шкале интервалов необходимо осуществить уменьшение полученного комплекса, при этом существуют несколько альтернативных вариантов принятия решения:

1. Оставить весь комплекс целей.
2. Уменьшить комплекс целей методом Парето, АВС-анализа и им подобным.
3. Оставить только одну цель.

В рамках проекта НИЛ «Литейные технологии» было осуществлено уменьшение комплекса свойств будущей технологии по методу Парето, после чего остались следующие свойства: технологичность и структура заготовки.

Затем необходимо перейти к реализации второго этапа общей стратегии эффективной разработки инновационных материалов и покрытий в области машиностроения, результатом которого является ранжированный по приоритетности ряд технологий. В случае, если результатом реализации первого этапа является комплекс целей, то для каждой в отдельности необходимо реализовать второй этап общей стратегии, а затем составить общий рейтинг приоритетности технологий для выбора наиболее приоритетной инновационной технологии (рисунок 2).

|        |                |                |                |                |                |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Цель 1 | T <sub>1</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| Цель 2 | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |
| Цель 3 | T <sub>4</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| Цель 4 | T <sub>1</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>5</sub> |

Рисунок 2 – Рейтинг приоритетности инновационных технологий



### Литература

1. Наука и инновационная деятельность в Республике Беларусь. Статистический сборник / И.В. Медведева – председатель редакционной коллегии – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2018. – 98 с.

2. Серенков П.С. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации: учеб. пособие / П.С. Серенков [и др.]. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2014. – 256 с.

3. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер – М. : Радио и связь, 1992. – 504 с.

4. Сатаров Г.А., Каменский В.С. Общий подход к анализу экспертных оценок методами неметрического многомерного шкалирования / Сатаров Г.А., Каменский В.С. – В кн. : Статистические методы анализа экспертных оценок. – М., 1977. – 107 с.

УДК 006.91

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭТАПЫ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Серенков П.С., Солодухо Ю.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В соответствии с СТБ 2450 система измерений или измерительная система – это набор инструментов или средств измерений, эталонов, операций, методов, приспособлений, программного обеспечения, персонала, окружающей среды и предположений, используемый для определения количества единиц измерений или фиксированных величин в измеряемой характеристике, то есть полный процесс, который используется для проведения измерений. Следует отметить, что первенство в появлении понятия «система измерений» принадлежит американским метрологам – производителям автомобильной техники. В рамках отраслевого стандарта на СМК QS9000 было разработано руководство Measurement Systems Analysis (MSA), 4-я редакция которого и легла в основу вышеуказанного стандарта.

Говоря о системе измерений, следует отметить, что она является ключевым элементом системы менеджмента измерений, требования к наличию которой устанавливает новая редакция стандарта СТБ ISO 9001, и техническая составляющая результативности которой обеспечивается результативностью системы измерений. Причем под управлением системы менеджмента измерений может находиться одновременно несколько единичных систем измерений.

Для обеспечения правильности построения и предъявления требований к системам измерений принято их классифицировать. Причем классы отличаются целями и задачами (назначением), нормативно-методическим обеспечением и особенностями жизненного цикла процедур. Двухуровневая (в общем случае) иерархическая структура систем измерений выглядит следующим образом.

На нижнем уровне находится система измерений для целей прямых измерений, имеющая в своей основе модель системы прямого измерения. К системе прямого измерения предъявляется классическое требование к точности результата измерения в виде:  $A = A_0 \pm U, P$ . Все более сложные системы измерений высшего уровня

имеют в своей основе одну или несколько систем прямых измерений.

Системы измерений второго или высшего уровня – это системы измерений для целей косвенных (сложных) измерений, системы измерений для целей испытаний и системы измерений для целей контроля.

К системам измерений для целей косвенных измерений предъявляется требование обеспечить получение результата измерений параметра с заданной (или меньшей) неопределенностью. Как правило, требуемый итоговый параметр связан с составляющими функциональной зависимостью. Каждая из составляющих на низшем уровне представляет собой систему измерений для целей прямых измерений.

К системам измерений для целей испытаний предъявляется требование обеспечить получение результата испытаний с заданной (или меньшей) неопределенностью. Испытания представляют собой измерения, проведенные в определенных заданных условиях, которые влияют на результаты этих измерений и от которых зависит их результат. Таким образом, каждая из влияющих на результат испытаний величин на низшем уровне представляет собой систему измерений для целей прямых измерений.

Системы измерений для целей контроля классифицируются на системы измерений для целей измерительного контроля и системы измерений для целей метрологического контроля (например, поверка). К системам измерений для целей измерительного контроля предъявляется требование дать заключение о годности с заданной степенью риска (обеспечить заданный уровень риска). К системам измерений для целей метрологического контроля предъявляется требование дать заключение о годности средства измерений к применению, то есть заключение о нахождении метрологических характеристик средства измерений в пределах установленных границ. И измерительный, и метрологический контроль

представляет собой прямые или косвенные измерения, результаты которых сравниваются (иногда по специальным правилам) с предельно допустимыми границами. Таким образом, каждое из измерений на низшем уровне представляет собой систему измерений для целей прямых измерений.

Следует отметить, что во всех перечисленных выше случаях, в зависимости от сложности система измерений по аналогии с поверочной схемой может иметь форму разветвленной структуры, однако на самом низшем уровне всегда будет система измерений для целей прямых измерений.

Для того, чтобы разработать результативную систему измерений, необходимо рассматривать процесс измерений комплексно, во-первых, как процесс (процессный подход), который в качестве выходных данных «создает» числа (данные), а во-вторых, СТБ 2450 и руководство MSA рассматривают систему измерений на всех основных этапах ее жизненного цикла (системный подход).

В наиболее общем случае система измерений имеет следующий жизненный цикл:

- планирование;
- проектирование и реализация;
- апробация, валидация и верификация;
- эксплуатация и поддержание в рабочем состоянии;
- полный анализ;
- совершенствование.

Концепция жизненного цикла системы измерений заключается в том, что система измерений с течением времени может претерпевать изменения по мере изучения и совершенствования процесса.

Таким образом, техническая составляющая обеспечения результативности системы менеджмента измерений заключается в ресурсном и методическом обеспечении этапов жизненного цикла единичной системы измерений как основного объекта менеджмента в части управления качеством механизмов преобразования.

Структура жизненного цикла системы измерений определяет ее состав (этапы), их последовательность и взаимосвязи. Рассмотрим основные этапы жизненного цикла систем измерений немного подробнее.

Этап планирования. На этом этапе происходит формирование концепции метода измерений и применяемых средств, всесторонний комплексный анализ возможностей реализации последующих этапов, анализ сильных и слабых сторон, закладываются требования к дальнейшим этапам жизненного цикла. В результате получается оптимальная концепция метода, средств измерений и условий, в которых они выполняются.

Этап проектирования и реализации системы измерений является ключевым этапом жизненного цикла. На данном этапе происходит выбор и

техническое обоснование метода измерений, измерительного оборудования, персонала (операторов), окружающей среды (условий), эталона и т. д.

Этап апробации, валидации и верификации системы измерений. На данном этапе происходит проверка системы измерений (наличие и состав элементов, структуры) с целью определения ее соответствия требованиям, а также валидация/верификация в первую очередь метода измерений, в ходе лабораторного эксперимента с оформлением соответствующих подтверждающих документов.

Этап эксплуатации и поддержания в рабочем состоянии системы измерений. Поддержание системы измерений в рабочем состоянии подразумевает под собой осуществление мониторинга и контроля характеристик системы измерений (метода) в процессе рутинной эксплуатации. Типичным примером мониторинга характеристик системы измерений являются контрольные карты. Результатом мониторинга является идентификация и анализ тренда характеристик системы измерений.

Этап полного анализа системы измерений. Данный этап жизненного цикла реализуется в случае получения результатов, сигнализирующих об ухудшении характеристик системы измерений на этапе мониторинга. Целью этапа полного анализа является выявление причин, из-за которых система измерений по той или иной характеристике перестает соответствовать требованиям.

Этап совершенствования системы измерений. Данный этап реализуется либо по результатам этапа полного анализа системы измерений, либо в инициативном порядке (например, при изменении требований к системе измерений, ужесточении требований заказчика, изменении требования ТНПА). Как следствие, выходом этого этапа является изменение требований к системе измерений.

Таким образом, говоря о системе измерений необходимо учитывать целый ряд этапов, каждый из которых имеет свои нюансы и от которых зависит ее результативность. Причем обеспечение этих этапов подразумевает под собой целый спектр методов – от метрологического подтверждения основного измерительного оборудования до статистических методов контроля качества рутинных измерений.

Проблемой является то, что несмотря на наличие действующей в Республике Беларусь Системы обеспечения единства измерений, единого подхода или документа, «закрывающего» все этапы жизненного цикла системы измерений в ней нет. С другой стороны, существует достаточно богатая зарубежная практика метрологической деятельности.

Поэтому первая задача состоит в рассмотрении и анализе как подходов Системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь

в отношении отдельных метрологических аспектов обеспечения различных этапов жизненного цикла системы измерений, так и зарубежных эмпирических подходов и наилучших метрологических практик.

Затем стоит задача на основе системного и эмпирических подходов по принципу взаимно-

го дополнения реализовать комплексный подход к ресурсно-методическому обеспечению всех этапов жизненного цикла системы измерений с целью обеспечения технической составляющей системы измерений как центрального элемента системы менеджмента измерений.

УДК 004.35

## ИСПЫТАНИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Соломахо В.Л., Соколовский С.С., Денисов Н.Г.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в связи с ростом количества технологических задач, решаемых при производстве продукции приборостроения и машиностроения, их дифференциации, возрастают требования к технологическому оборудованию, предназначенному для их решения.

Технологическое оборудование становится более сложным и специализированным, что приводит к усложнению его конструкции и вызывает необходимость интеллектуализации систем управления [1]. На смену субтрактивным технологиям приходят аддитивные, основанные на формировании изделия путем 3D печати, позволяющей материализовывать объекты из их цифровых моделей.

Аддитивные технологии имеют свои преимущества и недостатки. Качество технологий в значительной степени определяется точностью изготавливаемых объектов, которая определяется как точностью самого оборудования, так и используемыми для печати материалами, методом печати, режимом воспроизведения модели и другими влияющими факторами, определяемыми требованиями к технологической операции.

Весомый вклад в формирование точностных характеристик объекта вносит геометрическая и кинематическая точность, которые определяют пространственное положение рабочих узлов 3D-принтера.

Для оценки точности позиционирования нами была разработана методика испытаний, в ходе которой оценивалась точность пространственного положения рабочих органов, формирующих 3D-модель.

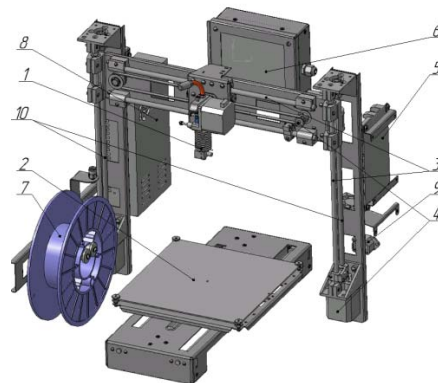
Методика разрабатывалась для 3D-принтера, работающего на методе послойного наплавления FDM (рисунок 1).

В рассматриваемом принтере движение печатающей головки осуществляется по осям  $Ox$ ,  $Oz$  (ZX-head), а движение по оси  $Oy$  осуществляет стол (Y-bed). Движение по осям осуществляется с помощью шаговых двигателей.

Определение точности позиционирования рабочих элементов принтера осуществляется для

каждой из осей перемещения рабочих узлов  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ .

Окончательной оценкой точности является вероятностная сумма полученных отклонений для каждой из осей с учетом неопределенности, вносимой шаговыми двигателями, так как она влияет на кинематическую составляющую неопределенности положения рабочих элементов и в методике не учитывается.



1 – экструдер; 2 – стол; 3 – направляющие;  
4 – двигатели; 5 – контроллер; 6 – фильтр;  
7 – катушка; 8 – блок питания; 9 – вилка сетевая;  
10 – винты ходовые

Рисунок 1 – 3D-принтер, работающий на методе FDM

Основой испытательной установки является 3-хкоординатная измерительная машина, на рабочий стол которой устанавливается корпус с рабочими узлами 3D-принтера. Главной задачей на первом этапе является совмещение систем координат 3-хкоординатной измерительной машины и 3D-принтера.

Для проведения данной процедуры необходимо осуществить ощупывание горизонтальной цилиндрической направляющей принтера, по которой осуществляется перемещение по оси  $Ox$ , в  $n$  сечениях (рисунок 2).

Таким образом, будет задана ось  $Ox$ , после чего необходимо осуществить аналогичную процедуру для направляющей вдоль оси  $Oz$ , а ось  $Oy$  будет выстроена автоматически.

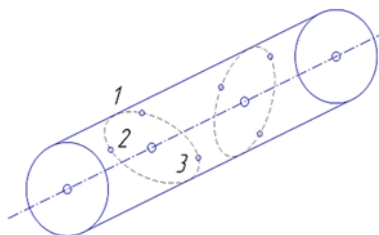


Рисунок 2 – Схема определения направления оси (при аппроксимации по 2 сечениям)

Для измерения позиционного отклонения при перемещении вдоль оси  $Ox$  используется специально спроектированная контрольная сфера (рисунок 3).

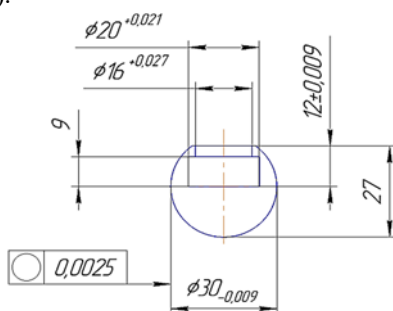
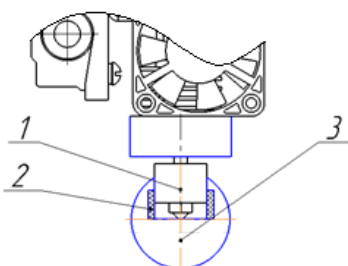


Рисунок 3 – Контрольная сфера

Способ крепления контрольной сферы на сопло экструдера представлен на рисунке 4.



1 – сопло экструдера; 2 – резиновое уплотнительное кольцо; 3 – сфера

Рисунок 4 – Крепление контрольной сферы на экструдере

После установки сферы осуществляется ее ощупывание по 3 точкам для определения ее центра и задания его в качестве точки отсчета (рисунок 5).

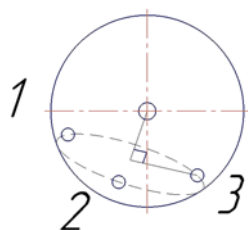


Рисунок 5 – Схема расположения контрольных точек

Затем необходимо осуществить перемещение экструдера в контрольные точки вдоль оси  $Ox$  с шагом  $L_1/5$  ( $L_1$  – длина рабочего хода вдоль оси  $Ox$ ), определить в них центр сферы и зафиксировать отклонения относительно точки отсчета. После фиксирования отклонений на данном уровне сетки контрольных точек необходимо переместить экструдер вдоль оси  $Oz$  на заданный шаг  $L_2/5$  вниз ( $L_2$  – длина рабочего хода вдоль оси  $Oz$ ), и на новом уровне задаться новым началом отсчета и повторить операцию измерения вдоль оси  $Ox$ .

Аналогично осуществляется измерение позиционного отклонения при перемещении вдоль оси  $Oz$ , однако, для выхода на следующий уровень сетки контрольных точек экструдер необходимо переместить вдоль оси  $Ox$ .

При измерении отклонения вдоль оси  $Oy$  необходимо закрепить сферу на перемещающемся столе с помощью специально спроектированного держателя сферы.

Сфера устанавливается в центр перемещающегося стола, где задается точка отсчета и проводятся измерения вдоль оси  $Oy$ . После перемещения стола на заданный шаг  $L_3/3$  ( $L_3$  – ширина базирующего стола) вдоль оси  $Oy$  сферу перемещают в противоположном движению стола направлении с шагом, равным шагу перемещения стола. Таким образом, сфера возвращается в точку пространства, в которой производится печать, так как рабочий материал наносится по осям  $Ox$  и  $Oz$ .

После проведения всех указанных выше измерений необходимо определить окончательный результат неопределенности позиционирования рабочих элементов в пространстве.

Для зафиксированных отклонений при перемещении вдоль оси  $Ox$  находим наибольшую разность двух составляющих и затем находим геометрическую сумму полученных отклонений. Аналогичная процедура проводится для отклонений вдоль осей  $Oy$  и  $Oz$ .

После нахождения составляющих  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  находим их геометрическую сумму с учетом составляющей неопределенности, вносимой двигателями.

Вычисленная величина является оценкой точности позиционирования рабочих элементов 3D-принтера.

Таким образом, была оценена точность позиционирования рабочих элементов исследуемого принтера.

### Литература

1. Интеллектуализация техники – главный вектор современной эволюции: сб. науч. ст. Международное философско-космологическое общество / науч. ред. Э.А. Витол. – Киев, 2013. – 244 с.

УДК 625.7.08

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКОГО АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Романов А.Ф., Ходасевич А.И., Чернобай И.А.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Разработанный георадарноакустический метод измерений прочности дорожных покрытий основан на измерении модуля упругости  $E$  слоев дорожных одежд (СДО) путем измерения скоростей распространения  $v_1, v_2, \dots, v_n$  акустических колебаний в каждом слое покрытия по временам распространения радиолокационных сигналов, отраженных от границ слоев дорожных покрытий [1-4]. Модуль  $E_n$  определяется с учетом плотности  $\rho_n$  по скорости акустических колебаний:

$$E_n = \rho_n \cdot v_n^2. \quad (1)$$

Измерения скорости распространения акустических колебаний реализуется по временам распространения  $T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{pn}$  акустических волн, определяемым по моментам выделения фазоамплитудных флуктуаций отраженных радиолокационных сигналов от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через контролируемые покрытия. На основании полученных результатов для времен распространения вычисляются скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем ... и  $n$ -ом слоях:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{p1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{pn} - T_{pn-1}}, \quad (2)$$

где  $l_1; l_2; \dots; l_n$  – толщины каждого слоя, измеряемые посредством отраженных радиолокационных сигналов по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}, \quad (3)$$

где:  $c_0$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – отметки времени в наносекундах, измеряемые радиолокационным сигналом от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента его приема при отражении от каждой границы между слоями дорожной одежды;  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  – величины диэлектрической проницаемости слоев.

Компенсация динамических погрешностей измерений и обеспечение высокой помехоустойчивости при достаточно большой скорости сканирования автомобильной дороги достигается применением опорного, радиолокационного сигнала. Это осуществляется методом адаптивной обработки сигналов георадарно-акустических измерений [5].

Достоинством предложенного метода является то, что вибрационно-акустические колебания слоев являются периодическими с многократным повторением периодов колебаний после возбуждающих импульсных воздействий, например, от воздействий проходящих автомобилей. Исходя из этого, является целесообразным накапливать сигналы путем измерения и регистрации спектров колебаний СДО путем применения функции Фурье-преобразования периодических сигналов. Поэтому на основании уравнений (4) и с учетом того, что резонансная частота  $f_n$  каждого слоя обратно пропорциональна двойному времени распространения  $T_{pn}$  вибрационно-акустического сигнала, путем несложных преобразований можно получить:

$$v_1 = 2l_1 f_1; \dots; v_n = 2l_n f_n, \quad (5)$$

Окончательно формулы для определения прочности слоев дорожных покрытий на основании уравнений (5) и (1) приобретают вид:

$$E_1 = 4\rho_1 l_1^2 f_1^2; \dots; E_n = 4\rho_n l_n^2 f_n^2. \quad (6)$$

В соответствии с изложенным выше порядком функционирования, заключающимся в реализации алгоритмов измерений по уравнениям (2) ÷ (6), в аппаратном комплексе для повышения достоверности и оперативности измерений применялся более эффективный метод представления сигналов в частотном виде путем реализации функции прямого Фурье-преобразования сигналов. Этот метод за счёт непрерывного усреднения выделяемых сигналов в узких полосах частотного спектра позволил получать более достоверные и уточненные результаты измерений в конкретных величинах частот, в пересчете равных временам распространения сигналов в слоях дорожных одежд в соответствии с формулами (2, 5). Для этого исследуемый участок дорожного покрытия автомобильной дороги приводился в резонанс как коротким ударным импульсом, так и ударно-импульсным возбуждением проходящих по дороге автомобилей. По импульсу синхронизации запускался в работу цифровой осциллограф, который посредством функции Фурье-преобразования регистрировал резонансные вибрационно-акустические колебания дорожной конструкции.

Для повышения точности измерений начало формирования спектра осуществлялось по первому импульсу синхронизации, выделяемому из вибрационно-акустических импульсов внешнего возбуждения, вызываемых проходящими автомобилями. Это позволило получать в автоматическом

режиме измерений достаточно точную информацию о резонансах конструкций дорожных одежд.

По частоте резонанса и толщине слоя покрытия управляющим компьютером автоматически вычислялась скорость распространения вибрационно-акустических колебаний в каждой асфальтобетонной плите в соответствии с уравнениями (5). Далее в соответствии с формулами (6) определялся модуль упругости.

В качестве примера один из конкретных экспериментальных результатов определения модуля упругости получен следующим образом. Например, для среднего слоя автомобильной дороги частота собственных колебаний равна:  $f_c = 5\ 670$  Гц (см. рис. 1).



Рисунок 1 – Участок спектрограммы собственных колебаний соответствующий среднему слою покрытия исследуемой дорожной конструкции

По результатам георадарных измерений результат усредненных мгновенных (с частотой 40 МГц) значений толщины среднего слоя составил: 20 см. Следовательно, для среднего слоя автомобильной дороги скорость распространения акустических волн в соответствии с (5) равна:  $v_c = 2 \cdot l \cdot f_c = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-2} \cdot 5670 = 2268 \text{ м/с}$ .

Модуль упругости соответственно равен:

$$E = \rho \cdot v_c^2 = 2190 \cdot 2268 \cdot 2268 = 11265 \text{ МПа}.$$

С целью получения метрологических оценок и сравнения полученных результатов, в лабораторных условиях были определены модули упругости нескольких слоев, в том числе верхнего и среднего слоев конкретной дорожной конструкции.

Сравнительные лабораторные испытания модулей упругости этих слоев, проведенные по стандартной методике независимым методом,

дали результаты, совпадающие с полученными приборными данными на уровне  $\pm 3,0\%$ , что для подобных исследований характеризует высокое качество проведенной разработки.

Следовательно, лабораторные исследования и сравнения полученных результатов с приборными данными, полученными в режиме автоматических экспресс-измерений прочности слоев дорожных покрытий, показали высокое качество проведенной разработки.

### Литература

1. Чернобай, И.А. Совершенствование георадарной технологии для определения качества автомобильных дорог / А.В. Громыко, А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Материалы 4-ой МНТК «Приборостроение-2011», – Минск, 2011. – С. 295–296.
2. Чернобай, И.А. Георадарноакустическая аппаратура экспресс-контроля качества покрытий автомобильных дорог / А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2013. – 380 с. – С. 296–304.
3. Чернобай, И.А. Функционирование георадарноакустического комплекса по определению прочности слоев автомобильных дорог / А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2013. – 380 с. – С. 305–311.
4. Чернобай, И.А. Исследование точности функционирования георадарноакустического аппаратного комплекса по определению прочности дорожных покрытий / А.В. Громыко, А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Материалы третьей МНПК «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», – Минск, 28-29 апреля 2015. – С. 208–213.
5. Чернобай И.А., Романов А.Ф., Ходасевич А.И. Метод и аппаратура компенсации динамических погрешностей георадарноакустических измерений прочности дорожных покрытий. – Научно-практический журнал Неразрушающий контроль и диагностика. – № 4. – 2017. – С. 16–33.

УДК 621

### МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МЕР ВМЕСТИМОСТИ СТЕКЛЯННЫХ

Хомич О.А.<sup>1</sup>, Киселёв М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Согласно закону Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» все средства измерений, используемые в сфере законодательной метрологии, должны подвергаться мет-

рологическому контролю с целью обеспечения необходимой точности измерений и защиты прав и законных интересов граждан и государства от последствий неточных и неправильно выпол-

ненных измерений. Метрологический контроль включает в себя утверждение типа средств измерений, метрологическую аттестацию средств измерений, поверку, калибровку и метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений. В отношении средств измерений, таких как меры вместимости стеклянные, это будет поверка, калибровка, метрологическая аттестация и утверждение типа средств измерений. Для периодического метрологического контроля используются поверка либо калибровка.

К мерам вместимости стеклянным относятся такие средства измерения как цилиндры, мензурки, колбы и пробирки по ГОСТ 1770; бюретки и пипетки по ГОСТ 29227; измерительные колбы к вискозиметру типа ВУ по ГОСТ 1532; колбы стеклянные с градуированной горловиной по ГОСТ 12738; измерительные стаканы к осадкомеру и дождемеру по ГОСТ 29932 и другое. Применительно к мерам вместимости стеклянным поверка проводится поверка лишь однажды – при выпуске из производства и действует на протяжении всего срока эксплуатации данного средства измерений. Поверка таких средств измерений проводится по ГОСТ 8.234-2013 «Меры вместимости стеклянные. Методика поверки».

Таким образом, до недавнего времени не существовало способов периодического метрологического контроля в отношении мер вместимости стеклянных. А ведь меры вместимости стеклянные используются в таких важных жизненных сферах как здравоохранение, химическое производство и другие, где осуществляется проведение опытов, испытаний и точных измерений. Технические параметры и метрологические характеристики средств измерений очень важны в этом случае. Поэтому была разработана методика калибровки МРП МК 47 07.452 – 2016 «Меры вместимости стеклянные. Методика калибровки», что стало позволять получать результат в виде отклонения от номинального значения действительной вместимости и расширенной неопределенности, основанного на предполагаемом нормальном распределении.

Результат измерений при поверке предполагает вероятность более широкого разброса показаний, чем результат измерений при калибровке, где более узко с заданной вероятностью можно предполагать попадание результата измерения в указанный диапазон. Таким образом, применение результата измерений, полученного при калибровке, в некоторых случаях будет предпочтительным, потому что сможет обеспечить необходимую точность в отличие от результата измерений, полученного при поверке. Тем более, что при первичной поверке мер вместимости стеклянных в свидетельстве о поверке указан результат в виде соответствия меры вместимости стеклянной своим техническим и метрологиче-

ским характеристикам. И, зачастую, действительное значение вместимости остается неизвестным, если это не указано в свидетельстве о поверке или паспорте на средство измерения.

При калибровке, как правило, выполняется большее количество операций по определению вместимости, что позволяет иметь более широкое представление о самом средстве измерения. Это позволяет провести анализ в части улучшения его метрологических характеристик, например, выполняя измерительные операции в лучших условиях окружающей среды, создавая их в калибровочной лаборатории. Если это возможно при выявлении исключить иные влияющие факторы, либо учитывать их влияние на результат измерения путем внесения поправок и другими способами.

Меры вместимости стеклянные имеют свою классификацию и классы точности. В зависимости от класса точности средства измерения отклонение от номинального значения вместимости могут отличаться в несколько раз, что гораздо ограничивает их область использования. Применение результатов калибровки позволяет сделать данное средство измерений более универсальным независимо от класса точности меры вместимости стеклянной, потому что, как показывает практика, метрологические характеристики средства измерения при калибровке имеют лучшие параметры, чем метрологические характеристики средства измерения при поверке.

Если в мере вместимости стеклянной есть шкала (например, цилиндры), то при калибровке есть возможность более детально изучить конкретное значение вместимости или несколько точек вместимости, которые при работе используются чаще всего. Таким образом, имея результаты измерения в нескольких точках, можно предположить результаты на всем диапазоне и определить интересующие нас значения вместимости методом интерполяции, если имеет место зависимость отклонения от номинального значения вместимости к самому значению номинальной вместимости меры стеклянной. Если шкала измерения вместимости отсутствует, то по результатам измерения при калибровке возможно нанесение одной либо нескольких меток, что в дальнейшем поможет при для проведения операций с использованием необходимой дозы объема.

Существуют следующие виды мер вместимости стеклянных:

- наливные;
- отливные.

Обычно вид указан на горловине средства измерения буквенным обозначением:

- Н – наливная;
- О – отливная.

Эти два вида принципиально отличаются по способу применения и соответственно по под-

готовке к работе и измерениям при их помощи. Как правило, большинство мер вместимости наливных, что значительно увеличивает время на их подготовку к измерениям, так как при подготовке к работе с ними необходимо произвести промывку мыльным раствором или дистиллированной водой. Меры вместимости считаются чистыми, если при выливании из них дистиллированной воды последняя не собирается на внутренних стенках в виде струек, полос и капель. Затем наливные меры вместимости и выдерживают 3-5 часов. Отливные меры перед калибровкой смачивают водой. Поэтому целесообразно пересмотреть методику калибровки в части уменьшения количества измерений в одной точке. Необходимо изучить методы подготовки к калибровке, и, если есть такая возможность, сократить время на эти операции, не ухудшая при этом характеристики чистоты мер вместимости стеклянных.

Существует несколько методов для определения действительной вместимости мер стеклянных. Это объемный метод, при котором применяются средства измерений объема более высокого класса и фактически сравнивается вместимость более точного средства измерения объема с тем средством измерения объема, вместимость которого необходимо определить. Второй метод при помощи взвешивания на лабораторных весах, погрешность которых не оказывает значительного влияния на результат измерений. В зависимости от класса и вида мер вместимости стеклянных, а также их конструктивных особенностей используют тот или иной метод. Необходимо более детально изучить каждый из этих методов, чтобы определить возможность использования в том или ином случае.

В разработанной методике рассмотрена калибровка таких средств измерений как цилиндры и колбы, что значительно ограничивает область ее применения. Как показала практика, существует необходимость в пересмотре методики калибровки в отношении других мер вместимости стеклянных и, возможно, методов применяемых при калибровке, представлении результатов калибровки и ее дальнейшая модернизация с целью использования.

#### Литература

1. Закон Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХІІ «Об обеспечении единства измерений», 2014.
2. Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь № 17 от 16.03.2007 «Об утверждении перечня областей в сфере законодательной метрологии».
3. ГОСТ 8.234 «Государственная система обеспечения измерений. Меры вместимости стеклянные».
4. ГОСТ 29932 «Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Общие технические условия».
5. ГОСТ 1770 «Посуда мерная лабораторная стеклянная. Цилиндры, мензурки, колбы, пробирки. Общие технические условия».
6. ГОСТ 29227 «Посуда лабораторная стеклянная. Пипетки градуированные. Часть 1. Общие требования».
7. ГОСТ 1532 «Вискозиметры для определения условной вязкости».
8. ГОСТ 12738 «Колбы стеклянные с градуированной горловиной. Технические условия».
9. МРП МК 47 07.452-2016 «Меры вместимости стеклянные. Методика калибровки».

УДК 617.3

### КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА

Цапенко В.В., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

**Постановка проблемы.** Анализ человеческой походки, является объектом мировых научных исследований. Различные заболевания и повреждения органов опоры нередко сопровождаются серьезными функциональными нарушениями двигательного аппарата, снижением силы и тонуса мышц, утратой способности к нормальным движениям, что в конце концов приводит к инвалидности и последующей потере трудоспособности [1]. Диагностика осанки человека не была бы полной без измерения и оценки состояния опорно-рессорных свойств его стопы.

Стопа является структурным сегментом опорно-двигательного аппарата, которая обеспе-

чивает его стато-локомоторную функцию, и представляет собой целостный морфофункциональный объект, от которого зависит подвижная функция человека [2]. В норме, благодаря сводчатому строению стопы и ее рессорной функции, ускорение до 70% гасится и амортизируется. При нормальном развитии опорно-двигательного аппарата человека нагрузки на стопу распределяются следующим образом: через тело таранной кости на пяточный бугор, ладьевидную и клиновидную кость, на головки I-III плюсневых костей, образуя при этом внешнюю продольную дугу. Таким образом, можно представить две продольные оси стопы. Одна, проходит через



середины пятки и промежутки между I и II плюсневых костями – это ось силы (опорный вектор), по которой передаются основные нагрузки при ходьбе, и другая, которая проходит через середину пятки и промежутки между II и III плюсневых костями, – ось равновесия и баланса, по которой проходят движения стопы при стоянии. Положение этой оси определяется как равная длина рычагов от этой оси до головок I и V плюсневых костей. При плоско-вальгусной деформации опорный вектор стопы смещается латерально (к внешнему краю стопы). Это меняет характер ходьбы, является причиной усиления динамической нагрузки на весь опорно-двигательный аппарат. [3]. Существенную роль играет и объективная оценка параметров биологических тканей [4].

**Постановка задачи.** Изучение патологических изменений в суставах стопы является особенно сложной задачей, в связи со специфической пространственной ориентацией ее осей и небольшими габаритными размерами исследуемого сегмента, что затрудняет установку специальных регистрирующих устройств. Данные особенности заставляют использовать сложные многокомпонентные комплексы, которые часто вносят свои аппаратные ошибки и нарушают нормальную биомеханику суставов стопы. [5]

Актуальной научно-технической задачей является разработка комплексного метода исследования пространственных биомеханических параметров стопы человека. Для объективизации контроля развития этапов патологий стопы у детей возникает острая необходимость использования метода, который не имеет лучевого воздействия, а также позволяет выполнять количественную оценку и контроль функций стопы не только в статике, но и в динамике, поскольку максимум удельной нагрузки на ее подошвенную поверхность при ходьбе значительно выше, чем в положении стоя на обеих конечностях. Таким образом достоверность такой оценки гораздо выше.

**Изложение основного материала исследования.** В данной работе предложен метод для количественной оценки выраженности вальгусной деформации стопы, где в качестве количественного показателя используется расширенный фронтальный динамический индекс (ФДИ)  $f$ , с последующим анализом диаграмм динамических кривых.

Согласно исследованиям Гурфинкеля, установлено – при вертикальной позе в норме масса тела на стопу распределяется следующим образом, 20,5 % – на передне-внутренний отдел стопы, 18,4 % – на передне-внешний отдел стопы, 5,5 % – на область свода, на пятку приходится – 55,6 %. По данным Давыдовой, при ходьбе масса тела человека распределяется следующим образом: на пятку приходится 33,2 %, на среднюю часть – 5 %, на

передне-внешнюю часть стопы – 26 %, на передне-внутреннюю – 35,8 %. [3]

При анализе подошвенного давления, вальгусная деформация стопы проявляется на основе смещения его к латеральному краю подошвы, увеличению нагрузки в области продольного свода, медиальной поверхности стопы. Однако данный метод является субъективным и в большей степени зависит от личного опыта специалиста. [3] Предлагается метод для количественной оценки выраженности вальгусной деформации стопы. В качестве количественного показателя используем значение фронтально-динамического индекса  $f$ . Для его расчета стопу делят на равные по ширине медиальную и латеральную зоны, с последующим расчетом соотношения давления  $P_l$  в латеральной зоне к сумме давления ( $P_l + P_m$ ) в латеральной и медиальной зонах (рис. 1). [3]

$$f = \frac{P_l}{P_l + P_m} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $P_l$  – давление в латеральной зоне стопы (Па);

$P_m$  – давление в медиальной зоне стопы (Па).

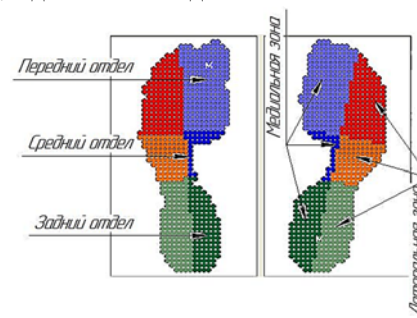


Рисунок 1 – Схема разделения стопы на латеральную и медиальную зоны для вычисления расширенного фронтального динамического индекса

Как видно из схемы (рис. 1), для предложенного метода, в процессе анализа, стопа разбивается на медиальную и латеральную зоны, которые в свою очередь целесообразно разделять еще на 3 отдельные области каждую (передний, средний и задний отделы стопы соответственно), для наглядности влияния распределения давления в каждой области подошвенной поверхности стопы на общую картину патологии. Как известно, передний отдел стопы отвечает за коленный сустав, а голеностопный и подтаранный определяются на середине отпечатка стопы. С этой закономерности возникает необходимость изменить и расширить формулу расчета ФДИ следующим образом:

$$f = \frac{P_{lf} + P_{lm} + P_{lr}}{(P_{lf} + P_{lm} + P_{lr}) + (P_{mf} + P_{mm} + P_{mr})} \cdot 100\% \quad (2)$$

В данной формуле индексы  $f$ ,  $m$ ,  $r$  – означают значения давления в переднем, среднем и заднем отделах латерального и медиального края стопы соответственно.

**Выводы.** Предложенный критерий расширенного фронтального динамического индекса, как количественный показатель распределения давления по подошвенной поверхности стопы, вместе с качественными показателями, полученными при анализе диаграмм динамических кривых более достоверно и полно оценивают параметры стопы и могут успешно использоваться для мониторинга эффективности различных методов лечения плоско-вальгусной деформации стопы.

### Литература

1. Цапенко В.В. Методика исследования про-странственных параметров стопы человека / Цапенко В.В., Терещенко Н.Ф. // Интегрированные интеллектуальные робототехнические комплексы (ИИРТК-2018). Одиннадцатая международная научно-практическая конференция 22-23 мая 2018 года, Киев, Украина. – К. : НАУ, 2018. – 334 с. (сборник тезисов). – С. 157–159.
2. Perepelkin A.I. Individual and typological characteristics of the human foot in the age aspect /

A.I. Perepelkin, V.B. Mandrikov, A.I. Krayushkin. – Raleigh, North Carolina, USA : Lulu Press, Inc, 2015. – 140 с.

3. Мармыш А.Г. Особенности распределе-ния подошвенного давления при плоско-вальгусной деформации стопы у детей / А.Г. Мармыш. // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. – 2017. – С. 400–404.

4. Терещенко Н.Ф. Исследование электропро-водимости биологических тканей / Н.Ф. Терещенко, В.В. Цапенко, Н.В. Чухраев // Вестник НТУУ «КПИ». Серия приборостроения. – 2017. – Вып. 53 (1). – С. 87–94.

5. Цапенко В.В. Цифровая биометрическая система исследования патологических состояний стопы / В.В. Цапенко, Н.Ф. Терещенко. // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения: материалы Международ. научн.-техн. конфер., 07-08 декабря 2018 г. Е.И. Сокол (глава оргком.). Харьков : ФОРМ Мезина В., 2017. – 252 с., С. 89–90.

УДК 53.083

## МЕТОДИКА ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК КОСМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Беляев Ю.В., Цикман И.М., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Попков А.П.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время на борту Международной космической станции (МКС) находится научная видео и фотоспектральная аппаратура (НА) [1] для проведения сеансов мониторинга земной поверхности. Первичная калибровка такой аппаратуры выполнена на комплексе «Каменя» [2] перед отправкой на МКС. Для последующих полетных калибровок разрабатываются методики с использованием мноуровневых спектрометрических измерений.

Методика калибровки бортовой НА предусматривает три уровня квазисинхронных измерений оптических отражательных характеристик тестовых участков: наземный, авиационный и космический. Квазисинхронность измерений означает одинаковую геометрии съемки тестовых объектов, т. е. при тех же значениях азимута инструмента, зенитного угла инструмента, азимута Солнца, зенитного угла Солнца.

Наземные измерения должны обеспечивать коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) выбранных тестовых объектов, а также полный набор входных параметров оптических характеристик атмосферы для проведения процедуры атмосферной коррекции спутниковых данных. Наличие авиационного уровня значительно повышает надежность и точность результата атмосферной коррекции.

Подготовка «наземного уровня» включает в себя кроме подготовки спектральной аппаратуры, выбор и описание тестовых объектов спектрометрирования. Выбор объектов для проведения измерений определяется особенностью траектории пролета МКС над территорией Беларуси. Поскольку измерения вблизи надир с борта МКС возможны для южной части Гомельской области, то и объекты выбираются из этой области. Для протяженных запланированных к мноуровневой съемке калибровочных площадок (тестовых объектов) подробно описывается ландшафтная, геоморфологическая структура, а также процентный состав произрастающей на ней растительности и прочие особенности. Определяются точки измерений, количество и расположение которых устанавливается исходя из визуальной оценки степени однородности объекта (чем однороднее объект, тем меньше может быть количество измерительных точек). Выбранные точки помечаются на местности, нумеруются и определяются их координаты. В отдельных точках проводятся угловые измерения. Минимальный набор угловых измерений: измерения в надир ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ), угол съемки бортовой НА и еще три положения спектрометра, например ( $\theta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ), ( $\theta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$ ), ( $\theta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ), где  $\theta$  – угол оптической оси относительно нади-

ра,  $\varphi$  – азимутальный угол относительно плоскости солнечного вертикала (рисунок 1) Угловые измерения проводятся не на всех измерительных точках при близости их спектрально-угловых характеристик отражения.

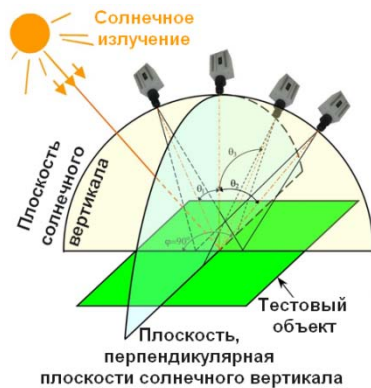


Рисунок 1 – Схема наземных угловых измерений тестового объекта

Подготовка «авиационного уровня» начинается с нанесение тестовых объектов на карту. При подготовке маршрутных данных – конфигураций трасс полета используются имеющиеся в наличии ретроспективные космические снимки, топографические карты и карто-схемы. На них наносятся все планируемые к измерениям тестовые участки в соответствии с географическими координатами, прорисовываются границы облета с использованием векторного представления. Для обследования значительной площади одним самолетом применяется метод «параллельного галсирования».

На люк в полу авиационного носителя монтируется специальный кронштейн, на который и устанавливается спектрометр с видеокамерой (рисунок 2, сверху). Во время полета оператор ориентируется на тестовые объекты по координатам GPS и при пролете над тестовыми точками проводит регистрацию данных.

Подготовка на «космическом уровне» происходит после передачи координат GPS тестовых объектов в группу сопровождения космического эксперимента, которая с использованием циклограммы полета (пространственно-временных параметров орбит космического аппарата) определяет время начала и конца бортовых измерений тестовых участков с указанием последовательности их съемки.

В рамках проводимых работ по разработке методик калибровки бортовой НА были выполнены квазисинхронные измерения СПЭЯ отраженного излучения тестовых объектов в Гомельской области. Измерения выполнялись спектро-радиометрами комплекса «Калибровка» [3] ССП-600Н (наземные) и ФСР (авиационные). Тестовыми участками, служили объекты с достаточно однородными отражательными характеристика-

ми: взлетная полоса аэродрома «Зябровка» и прилегающие к ней поля с травяной растительностью; отвалы фосфогипса Гомельского химического завода по производству удобрений; кольцевая структура из белого кристаллического песка на юго-западе Гомельской области.



Рисунок 2 – Аппаратура на борту авианосителя (сверху) и проведение авиационных измерений

При проведении наземных измерений фиксировались условия окружающей среды, время измерения, углы Солнца и т. п.

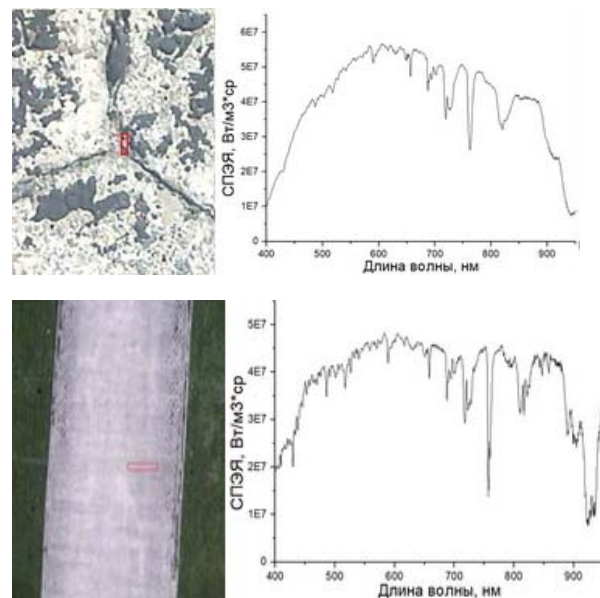


Рисунок 3 – Результаты видео и спектральных наземных (вверху) и авиационных измерений

При измерениях спектрорадиометр устанавливался на треноге на высоте 1,0–1,5 м над поверхностью земли. Для каждого нового положения оптической оси прибора регистрировалось не менее 10 спектров. Регистрация спектра отражения эталонного экрана проводилась непосредственно сразу же после измерения излучения от объекта, что минимизировало возможные изменения условий освещения. Значения КСЯ тестовых объектов получали нормированием значений СПЭЯ тестовой точки на величину СПЭЯ эталонного отражательного экрана.

Авиационные измерения проводились с борта авиационного носителя Авиатика МАИ-830 (рисунок 2) с высот 250 м и 900 м. Результаты авиационных и наземных измерений группировались и сортировались по тестовым точкам, пересчитывались в абсолютные единицы СПЭЯ и КСЯ, проводились усреднения спектров по пространственным измерительным точкам отдельных тестовых калибровочных участков и т. д. Пример предварительно обработанных данных представлен на рисунке 3.

УДК 682.62.018.012

## ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАНДАРТИЗОВАННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Цитович Б.В.<sup>1</sup>, Соколовский С.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации, метрологии и управлению качеством, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Среди всех технических устройств средства измерений (далее – СИ) выделяются рядом специфических особенностей, одна из которых состоит в необходимости нормирования их метрологических характеристик. Одна из проблем такого нормирования связана с трактовкой некоторых ключевых понятий, используемых в этой сфере. Для проведения анализа этой проблемы за основу примем определение из РМГ 29-2013 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» (который не включен Госстандартом Республики Беларусь в перечень документов, используемых в РБ, но действует в рамках СНГ), а также ГОСТ 8.009-84 «Межгосударственный стандарт. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» (анализируемые стандартные определения некоторых понятий выделены в тексте курсивом).

Между этими двумя документами есть некоторые нестыковки, но поскольку оба они являются действующими в СНГ, пользоваться приходится обоими. Кроме того, они дополняют друг друга, в частности, термины «вид выходного кода», «число разрядов выходного кода», «цена

## Литература

1. Цикман, И.М. Специализированный метрологический комплекс спектрально-энергетических калибровок систем оптического дистанционного зондирования / И.М. Цикман, Ю.В. Беляев, А.П. Попков // Приборостроение-2012; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2012 г. – С. 234–236.

2. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Гусев В.Ф., Десинов Л.В., Иванов В.А., Крот Ю.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сошенко В.А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии – 2016, № 2 (13). – С. 12-20.

3. Разработка комплекса наземной спектральной аппаратуры для обеспечения полетных калибровок спутниковых съемочных систем / Б.И. Беляев [и др.] // Шестой Белорусский космический конгресс: Материалы конгресса. В 2 т. (28-30 октября 2014 года, Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – Т. 1. – С. 234–237.

единицы наименьшего разряда кода», «номинальная ступень квантования», относящиеся к СИ с дискретным выходом, представлены именно в ГОСТ 8.009.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики. В этом определении, как и в других, упоминаются метрологические характеристики – основные свойства, которыми СИ отличаются от всех остальных технических устройств.

Метрологическая характеристика средства измерений – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений. Определение «неудачное», поскольку говорить о влиянии на результат измерений, например, диапазона измерений СИ не вполне корректно. Как любое техническое устройство СИ имеет ряд технических характеристик, из которых определяющими для этих технических объектов являются метрологические характеристики (далее – МХ). К МХ можно отнести те технические характеристики, которые непосредственно связаны с измерениями (полу-

чением, преобразованием и выдачей измерительной информации). У любого СИ есть технические характеристики, которые непосредственно не связаны с измерениями, например, масса СИ, его габаритные размеры, энергопотребление и др.

Метрологические характеристики очень разнообразны и имеют разную ценность для пользователей, разработчиков и исследователей СИ. Поэтому из всего возможного разнообразия для конкретных типов СИ устанавливают (нормируют) только выбранные метрологические характеристики.

Разработчики СИ сталкиваются с необходимостью нормировать МХ, что особенно сложно при разработке новых СИ, не имеющих прямых аналогов среди стандартных типов. Поскольку решаемые задачи часто однотипные, рассмотрим возникающие проблемы на примере нормирования МХ измерительных приборов, как обладающие достаточной общностью.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия. Измерительный прибор осуществляет полный цикл измерения: он получает измерительную информацию об измеряемой физической величине от объекта измерений, преобразует ее и выдает в форме, поддающейся непосредственному восприятию оператором.

Нормируемые метрологические характеристики СИ по ГОСТ 8.009 делят на группы, которые включают:

- характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки);

- характеристики погрешностей СИ.

В стандарте упоминаются группы характеристик чувствительности СИ к влияющим величинам, динамических характеристик СИ, неинформативные параметры выходного сигнала СИ, а также группа, названная «характеристики СИ, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений вследствие взаимодействия СИ с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов (таких как объект измерений, средство измерений и т. п.)».

Метрологические характеристики, включенные в первую группу («номинальные») достаточно важны, но практически не меняются в процессе эксплуатации, поэтому им уделяют несколько меньше внимания по сравнению с характеристиками второй группы, которые регламентируют точность СИ. В ГОСТ 8.009 эти характеристики названы характеристиками погрешности средства измерений. Однако термин «точностные характеристики», представ-

ленный в РМГ 29, является более общим, поскольку точность характеризуют не только погрешностями, но и неопределенностью.

Точностные характеристики средства измерений – совокупность метрологических характеристик средства измерений, влияющих на точность измерения.

Номинальные МХ, как и характеристики других групп, в значительной мере определяют структуру и возможности методики выполнения измерений (МВИ). Однако точностные характеристики СИ (наряду с точностными характеристиками метода измерений, условий и субъективными) существенно влияют на точность измерений, которая является одной из важнейших характеристик МВИ. Поэтому точностным характеристикам СИ уделяется особое внимание.

Различают интегральные и частные точностные характеристики СИ. К интегральным можно отнести точность и класс точности средства измерений. Пользователь предпочитает частные МХ точности СИ. К ним можно отнести погрешность средства измерений, нестабильность, смещение нуля и ряд других.

Нормативную характеристику, ограничивающую реальную погрешность годного средства измерений называют «предел допускаемой погрешности». Предел допускаемой погрешности средства измерений – наибольшее значение погрешности средства измерений (без учета знака), устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается метрологически исправным. В эти границы должна укладываться основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

Наряду с основной погрешностью СИ часто рассматривают его дополнительную погрешность (составляющую погрешности СИ, возникающую дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений). Относить «дополнительную погрешность» в приведенной трактовке только к погрешности средства измерений не всегда правильно, поскольку причиной возникновения этой составляющей погрешности измерения является отклонение влияющей величины от нормального значения. Это отклонение может привести не только к искажению сигнала в средстве измерений, но и к искажению объекта измерений (изменению значения измеряемой величины). Поэтому попытка учета воздействия влияющих величин только на средство измерений может оказаться недостаточной.

Основную погрешность СИ иногда разделяют на систематическую и случайную составляющие. При этом ансамбль систематических погрешностей группы однотипных СИ (генеральной совокупности этих СИ) будет представлять собой совокупность случайно распределенных систематических погрешностей, каждая из которых представляет собой детерминированную величину (принцип рандомизации систематических погрешностей). Сложности трактовки составляющих основной погрешности СИ (в том числе таких характеристик, как порог чувствительности, «разрешение» и «разрешающая способность измерительного прибора», «предел обнаружения» и др.) и отсутствие необходимости дифференциации этих составляющих погрешностей СИ, особенно систематических и случайных составляющих, приводит к отказу от их нормирования для рабочих СИ.

Еще менее удачной представляется попытка использования такой МХ как «инструментальная

неопределенность» (составляющая неопределенности измерений, обусловленная применяемым средством измерений или измерительной системой). Этот термин можно использовать для описания случайных составляющих показаний средств измерений, хотя при наличии термина «случайная погрешность средства измерений» он представляется не слишком нужным. Отказ от дифференциации систематических и случайных составляющих погрешностей СИ, приводит к отсутствию необходимости использования этой МХ. Сторонников неопределенности измерений, которые пытаются использовать ее вместо оценок погрешностей («более современный подход»), следует предупредить, что у определенных типов СИ систематическая составляющая погрешности значительно превышает случайную, а поэтому использование «инструментальной неопределенности СИ» может привести к неоправданному искажению оценки его точностных характеристик.

УДК 543.082/084:54-14; 544.01.082/084

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ МАСЕЛ

Карпович И.А.<sup>1</sup>, Лебедев В.И.<sup>2</sup>, Молчанов А.Г.<sup>2</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Оджаев В.Б.<sup>1</sup>,  
Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Двигатели современных автомобилей в процессе эксплуатации испытывают высокие механические и тепловые нагрузки, что определяет повышенные требования к качеству моторных масел. Деградация эксплуатационных характеристик масла в процессе работы двигателя обусловлена изменением физико-химических свойств масла и приводит к необходимости его замены в соответствии с регламентом, определяемым производителем. Однако, основные физико-химические показатели масла не всегда достигают предельных значений после регламентного пробега, указанного производителем для замены моторного масла, поскольку большое значение в данном случае имеют условия эксплуатации автомобиля (время работы двигателя, дорожные условия и т. п.) [1]. Разработка методов и средств контроля состояния моторных масел при различной степени нагруженности двигателя является актуальной задачей, решение которой позволит как повысить эффективность использования моторных масел, так и увеличить сроки эксплуатации двигателей транспортных средств.

Для проведения исследований разработан емкостной датчик контроля состояния моторных масел. Принцип действия датчика основан на гетеродинном методе – сравнении измеряемых резонансных частот для различных видов масел.

Структурная схема измерения представлена на рис.1. Генератор сигнала производит сканирование измерительной ячейки (колебательного контура) по частоте в диапазоне 100 Гц–10 МГц с заданным шагом. Одновременно микроконтроллер производит контроль амплитуды сигнала. При проведении сканирования по частоте микроконтроллер анализирует полученные данные и на ЖК-дисплее отображается значение частоты, соответствующее максимальной амплитуде сигнала, т. е. состоянию резонанса измерительной ячейки.

В работе исследовались синтетические, полусинтетические и минеральные моторные масла. В результате проведенных исследований установлено, что для синтетического моторного масла максимум резонансной частотной зависимости имеет более высокое значение, чем для минерального моторного масла (рис.2). Для полусинтетического моторного масла данный параметр имеет среднее значение по сравнению с синтетическим и минеральным моторным маслами. Это обусловлено различием в составе масел, а так же наличием различных присадок в синтетических маслах. Одним из основных комплексных физико-химических показателей масла является диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , которая зависит как от состава масла, так и времени использования его в двигателе. Для исходных масел диэлектрическая

проницаемость имеет наибольшее значение для минеральных и наименьшее значение для синтетических автомобильных масел.

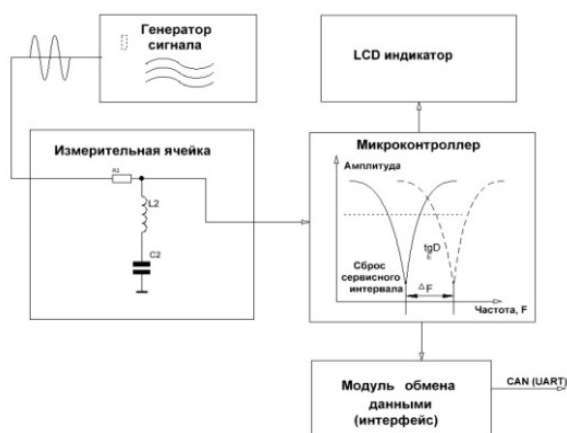


Рисунок 1 – Структурная схема измерения электрофизических параметров автомобильных масел

Минеральные масла, получаемые в процессе переработки нефти, состоят из молекул разной длины и разного строения. Синтетические масла, получают путем химических реакций, направленных на образование однотипных молекул органических веществ с заданными свойствами, в качестве которых выступают поли- $\alpha$ -олефины, алкилбензолы или эфиры (эстеры). Полусинтетические масла получают смешением минеральных и синтетических [2].

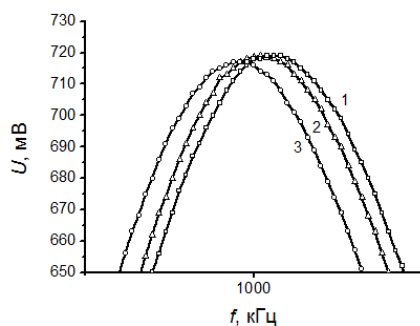


Рисунок 2 – Типичные виды спектрального распределения резонансной частоты синтетического (1), полусинтетического (2) и минерального (3) моторных масел

Диэлектрические свойства моторных масел в значительной степени обусловлены наличием полярных и неполярных молекул, а также характером связей между ними. Большинство молекул минеральных масел нефтяного происхождения, а также синтетических на основе поли- $\alpha$ -олефинов состоят из атомов, связанных неполярной связью, что обуславливает хорошие диэлектрические свойства данных масел. По сравнению с автомобильными маслами на основе поли- $\alpha$ -олефинов, масла на основе полиэфиров фосфорной и кремневой кислот вследствие присутствия в них кислорода, ко-

торый особенно склонен к поляризации, обладают худшими диэлектрическими свойствами. Под действием электрического поля неполярные молекулы автомобильного масла смещаются, что вызывает появление поляризационных токов или токов смещения. Полярные молекулы автомобильного масла стремятся повернуться так, чтобы их оси совпадали с направлением действия поля, что приводит к возникновению поляризационных зарядов и поляризации молекул автомобильного масла. Чем больше величина поляризационных зарядов, возникающих в моторном масле при наложении на него электрического поля, тем больше величина диэлектрической проницаемости исходного масла.

Одно из основных качественных отличий между минеральным и синтетическим маслами заключается также в термоокислительной стабильности, которая определяет продолжительность использования моторного масла [3]. На рис. 3 представлены типичные виды спектрального распределения резонансных кривых, соответствующих исходному моторному маслу, а так же маслу, подлежащему замене после пробега автомобиля в 15 000 км.

В результате исследований различных образцов отработанного моторного масла установлено, что в результате работы двигателя одновременно с деградацией физико-химических параметров моторного масла, так же происходит и уменьшение резонансной частоты электромагнитных колебаний измерительной ячейки по сравнению с аналогичным параметром для образцов исходного масла.

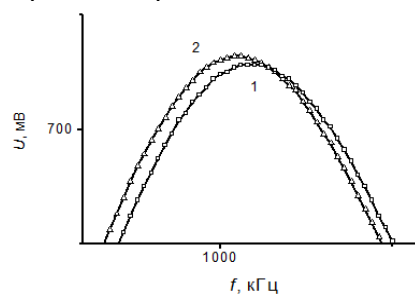


Рисунок 3 – Типичный вид спектрального распределения резонансной частоты исходного (1) и отработанного (2) полусинтетического моторного масла

Различие в максимумах значений резонансной частоты обусловлено тем, что в процессе работы двигателя наибольшее влияние на потерю работоспособности на моторное масло оказывают различные процессы: трения, окисления, коррозии, срабатывания присадок, сгорания, разбавления топливом, загрязнения механическими примесями извне и др. В результате комплексного воздействия этих многочисленных факторов происходит старение моторного масла, что

оказывает воздействие на величину диэлектрической проницаемости.

Установлено, что с увеличением пробега автомобиля значение диэлектрической проницаемости как комплексной характеристики моторного масла возрастает. Регистрация изменений резонансной частоты с помощью датчика контроля позволяет не только проводить постоянный мониторинг за изменением состояния автомобильного масла в процессе эксплуатации автомобиля, своевременно осуществлять его замену, но и осуществлять оперативный контроль за состоянием двига-

теля, что имеет весьма важное значение при эксплуатации транспортного средства.

#### Литература

1. ГОСТ 17479.1-85
2. Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химмотология горюче-смазочных материалов. Санкт-Петербург: НПИКЦ, 2007. – 488 с.
3. Соколов А.И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко, В.А. Аметов. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1991. – 200 с.

УДК 006.91:681.2.089(045)(476)

### О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ УСТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СФЕРЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Шабанов М.В., Разумный А.И.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

*Рассмотрена проблематика вопроса установления межповерочных интервалов для средств измерений, применяемых в Республике Беларусь, а также приведены рекомендации по их определению.*

Согласно [1] сфера законодательной метрологии (СЗМ) – установленные законом Республики Беларусь от 5 сентября 1995 года № 3848-ХП «Об обеспечении единства измерений», 2014, и иными законодательными актами Республики Беларусь сферы деятельности, в которых в целях обеспечения единства измерений осуществляются государственное регулирование и управление, а также государственный метрологический надзор. Государственное регулирование и управление ставит задачей минимизацию рисков возникновения неуправляемой ситуации, которая может негативно сказаться на экономической, социальной и других сторонах функционирования государства. В части применения средств измерений в СЗМ неуправляемая ситуация возникает, когда точность измерений, включая погрешность используемых средств измерений, превышает установленные для нее пределы. Например, превышение установленных пределов погрешности измерителя скорости ведет к необоснованным штрафам, а превышение пределов погрешности счетчиков воды – к недополучению оплаты за услуги ЖКХ. Указанные риски существуют как для граждан, так и для государства в отличие от применения средств измерений вне СЗМ, оказывающих локальное влияние на эффективность работы юридических лиц, их применяющих. Одним из способов минимизации рисков является периодический контроль правильности показаний средств измерений, для чего на государственном уровне вводятся соответствующие сроки периодической поверки. В Беларуси таким нормативно-правовым актом

является Постановление Госстандарта № 17, 2007 [2]. Однако ситуация неоднозначна, поскольку аналогичный смысл вкладывается в межповерочные интервалы (МПИ), указанные в Государственном реестре средств измерений Республики Беларусь (Госреестр СИ), что в последнее время привело к существенным различиям МПИ в СЗМ для однотипных средств измерений. Следует учесть, что в Госреестр СИ средства измерений вносятся в добровольном порядке, а сама процедура представляет собой независимую оценку качества средств измерений третьей стороной, что является дополнительным фактором их выбора покупателем. При закупках в государственных целях (ЖКХ, промышленные объекты, мониторинг окружающей среды и т. п.) данный фактор можно рассматривать как обязательный, несмотря на то, что все еще существует альтернатива в виде метрологической аттестации единичных экземпляров средств измерений. Логично, что МПИ в Госреестре СИ должен отражать в первую очередь качественную сторону средства измерений как обычного товара. Учитывая массовость и стоимость закупок средств измерений, применяемых в СЗМ (счетчики, топливораздаточные колонки, измерители скорости, весы и т. д.), МПИ последнее время стал играть роль «разменной монеты», что недопустимо с точки зрения существования рисков потери средствами измерений своей точности, как вследствие естественного износа, так и нарушения условий эксплуатации или мошеннического использования. Иными словами, МПИ в СЗМ связан не только с метрологической надежностью средства измерений, но и с дополнительными условиями их применения, что объясняет установление государством МПИ в СЗМ порой в несколько раз меньше, чем фиксируется при государственных испытаниях средств измерений в



целях утверждения типа. Поэтому правильным является указание в описании типа средства измерений МПИ, базирующегося на полученных изготовителем и/или органом, проводящим испытания, показателях надежности. МПИ в общем случае определяется изготовителем самостоятельно на основании собственных исследований метрологической надежности изготавливаемых средств измерений в ходе ускоренных испытаний, обработки статистики отказов (метрологических) в эксплуатации, априорной информации по надежности средств измерений, использующих аналогичную элементную базу и др. При первичном выходе на рынок такие МПИ ненадежны, поскольку применяются в условиях отсутствия эксплуатационной статистики (т. е. исследования характеристик ведутся в относительно идеальных условиях, в которых не учитываются все ситуации, могущие привести к ухудшению метрологических характеристик (МХ)) или используются вероятностные (приближенные) оценки надежности. Именно этим обстоятельством объясняется порой многократное различие МПИ для одних и тех же СИ, применяемых в СЗМ и вне ее. Очевидно, что меньшие МПИ в СЗМ обеспечивают более высокий уровень надежности показаний СИ, но в то же время увеличиваются расходы на проведение поверки, которые могут вырастать в значительные суммы, особенно если в целях поверки приходится останавливать технологический процесс. Нахождение баланса между затратами на поверку и минимизацией рисков для государства, вследствие получения недостоверной измерительной информации является первоочередной задачей для государственной метрологической службы. И в этом случае лучше перестраховаться в отношении срока МПИ, чем устранять последствия, имеющие государственные масштабы. Данный подход реализуется НПА Госстандарта [2]. Однако обоснованность МПИ в [2] порой вызывает вопросы, поскольку отсутствует понятная научно-методическая основа их назначения. Предположительно, МПИ [2] формировались исходя из опыта эксплуатации СИ времен СССР. С того времени надежность большинства средств измерений существенно выросла (о чем свидетельствует в т. ч. статистика эксплуатации), что закономерно должно привести к корректировке МПИ [2] для групп средств измерений.

С учетом вышесказанного необходимо решить два вопроса:

Указание в Госреестре СИ действительных МПИ, связанных с оцененной метрологической надежностью конкретных типов СИ.

Подведение научно-методической основы под МПИ, указанных в [2].

Решение данных вопросов позволит:

1. Устранить препятствия для отечественных изготовителей при выходе на внешние рынки по критерию МПИ.

2. Привести МПИ для средств измерений, указанных в Госреестре СИ, к их действительной метрологической надежности, позволяющей делать обоснованный выбор с учетом специфики производства и рисков изготовителя.

3. Ввести в практику работы органов по испытаниям средств измерений оценку принятых подходов к оценке надежности и установлению МПИ.

4. Принять для назначения МПИ в СЗМ понятный и обоснованный комплексный подход, базирующийся как на оценке надежности для групп средств измерений, так и оценке рисков применения данных групп в СЗМ.

5. Внести обоснованные изменения в [2], реализовав масштабные исследования в объеме п. 4.

В настоящее время Госстандартом принято решение (03.10.2017 НТК по метрологии Госстандарта № 09-2017) использовать для обоснования МПИ СИ методы назначения МПИ, регламентируемые в РМГ 74-2004 «Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений» [3]. Данный шаг является первым на пути выработки научно-методического подхода к назначению МПИ, но не ставит целью решение обозначенной системной проблемы.

Рассмотрим отдельные моменты практической реализации РМГ 74-2004, так как опыт показывает, что данный документ весьма сложен для понимания и использования и побуждает производителей к собственной интерпретации условий определения МПИ, что зачастую ведет к отказу Госстандарта в корректировке МПИ.

При назначении первичного МПИ новых типов СИ РМГ 74-2004 [5] предлагает использовать следующие источники информации (п. А.1 РМГ):

- результаты испытаний СИ или его отдельных блоков;
- данные о нестабильности элементов СИ, определяющих состояние метрологической исправности СИ;
- показатели надежности СИ, нормируемые или подтвержденные испытаниями;
- данные о МПИ СИ-аналогов, нормируемые или подтвержденные экспериментально.

Исходя из практики работы БелГИМ, наиболее часто встречающиеся варианты оценки МПИ связаны с использованием показателей надежности СИ, нормируемых или подтвержденных экспериментально (п. А.5.1 – А.5.2 РМГ). Информация об оценке надежности требуется в соответствии с [4] и предоставляется заявителем на государственные испытания СИ. Изготовитель СИ согласно ГОСТ 27.003-2016 [7] может использовать следующие методы определения надежности: расчетный, экспериментальный и расчетно-экспериментальный.

Расчетный метод, как правило, является самым приближенным из указанных. В таких расчетах нормируемые показатели надежности,

например, наработка на отказ, могут быть указаны чисто гипотетически, без предоставления каких-либо обосновывающих материалов. Также изготовители могут приравнивать вероятность безотказной работы СИ  $P(t)$  за время (наработку)  $t$  к вероятности работы СИ без метрологических отказов  $P_M(t)$  за время (наработку)  $t$  (допуская, что средняя доля  $q$  метрологических отказов в общем потоке отказов СИ (как в п. А.5.1.1) неизвестна), и среднюю наработку до первого отказа  $T_{cp}$  к средней наработке до первого метрологического отказа  $T_{cp,m}$  (допуская, соответственно, что средняя доля  $q$  метрологических отказов в общем потоке отказов СИ (как в п. А.5.2.1) неизвестна). Из-за таких допущений расчет не отражает действительную надежность в реальных условиях, так как совершенно очевидно, что не каждый отказ является метрологическим отказом в общем потоке отказов СИ.

Надежность сложных технических систем принято описывать экспоненциальным законом распределения надежности. При этом следует понимать, что рассматривая функцию надежности объекта, описываемую экспоненциальным (или логарифмическим распределением), мы допускаем его непрерывную работу и работу на «пределе» рабочих характеристик, не предполагающую длительных остановок или юстировок. Такое допущение занижает расчетную надежность в несколько раз. Например, используя  $T_{cp} = 220000$  часов согласно [9] можно найти точку времени 95 % вероятности безотказной работы (методом подстановки  $t$ ):

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}} = 2,71828^{-\frac{11000}{220000}} = 0,95$$

т. е. в данном примере при общем времени безотказной работы только в точке 11000 часов гарантирована практически безотказная работа. Показатель «гамма-процентной наработки на отказ» – наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , % (ГОСТ 27.002-2015) дает такое же число:

$$T_T = -220000 \times \ln(95/100) = -11284 \text{ часов.}$$

В расчетах МПИ для СИ, применяемых в СЗМ, мы как раз ориентируемся на 90–95-процентную безотказную работу, поскольку любой отказ в общем количестве отказов может быть метрологическим (т. е. произойдет потеря метрологических характеристик). Здесь также следует отметить, что не для всех средств измерений следует придерживаться критерия 95-процентный «метрологической» безотказности. Например, если для счетчика электрической энергии этот критерий работает, то для датчика давления, который участвует в косвенном расчете расхода, «метрологическая» безотказность имеет второстепенную значимость (по влиянию

на точность результата измерений) и приемлема на уровне от 60 %.

За наработку на отказ для СЗМ также можно использовать принятый изготовителем браковочный уровень  $T_\beta$ , т. е. момент времени, при котором фиксируется отказ изделия (одноступенчатый план испытаний на надежность). Анализируя документацию, прошедшую экспертизу в БелГИМ, можно отметить, что  $T_\beta$  несущественно превышает значения вышеприведенных расчетов гамма-процентной наработки на отказ.

Соответственно, в расчетах МПИ по РМГ 74 для СЗМ используются заниженные значения наработки на отказ, что дает заниженную оценку МПИ. В каждом отдельном случае увеличение МПИ с учетом реальной «загрузки» средства измерений может быть изменено. Например, если бытовые счетчики интенсивно работают утром и вечером (в среднем 15 часов из 24), то износ и иные эффекты, влияющие на общую надежность, будут ниже, что позволяет применить коэффициент 1.6. Разумеется, такой подход также должен быть согласован с государственным органом, курирующим соответствующую область учета ресурсов.

Достоверность оценки МПИ также снижает используемое в расчетах РМГ значение СКО распределения погрешности градуировки СИ при выпуске из производства  $\sigma_0$ . Возможно несколько способов получения оценки СКО  $\sigma_0$ : теоретический (исходя из применяемого эталона и условий калибровки/градуировки) и экспериментальный. При неизвестном  $\sigma_0$  РМГ рекомендует принимать его как  $\sigma_0 = 1/3\Delta$ , где  $\Delta$  – предел допускаемой погрешности СИ,  $\Delta_s$  – предел допускаемой погрешности СИ в реальных условиях его эксплуатации (как правило,  $\Delta_s \leq \Delta$ , иначе теряется смысл нормирования  $\Delta$ ; однако вариант, при котором  $\Delta_s = \Delta$ , рекомендуется рассматривать как наиболее худший случай) и применяемой доверительной вероятности (таблица 1 РМГ) и соответствующих им квантилей (коэффициентов) нормального распределения.

В любом случае указанных расчетов по п. А.2–А.5 РМГ достаточно для установления действительного МПИ при проведении государственных испытаний СИ в целях утверждения типа. В случае отрицательных результатов экспертизы материалов по обоснованию МПИ организация ГМС вправе временно установить минимальный первичный МПИ согласно [2], гарантирующий требуемый уровень метрологической надежности СИ.

При оценке МПИ по результатам эксплуатации следует учитывать способ поверки, так как информация, которую можно получить из протоколов, различна для различных способов поверки. РМГ устанавливает следующие способы поверки:

– установление действительных значений физических величин (градуировка) всех СИ, поступивших в поверку (первый способ поверки);

– определение пригодности СИ к применению по нормам стабильности (с браковкой тех СИ, изменение действительного значения или градуировочной характеристики которых за МПИ превысило предел допускаемой нестабильности, установленный для СИ данного типа) и градуировка СИ, признанных годными (второй способ поверки);

– определение пригодности СИ к применению с браковкой тех СИ, характеристика погрешности которых превышает по абсолютному значению предел ее допускаемых значений, установленный для СИ данного типа (третий способ поверки).

В зависимости от способа поверки РМГ устанавливает соответствующие критерии, служащие для корректировки межповерочных и межкалибровочных интервалов. Из вышеприведенного очевидно, что дрейф метрологических характеристик косвенно проверяется при втором способе поверки, поскольку пригодность СИ к применению определяется, прежде всего, сравнением нестабильности СИ, полученной в результате поверки, с нормируемыми значениями. Однако в большинстве случаев используется третий способ поверки, при котором осуществляется контроль по альтернативному признаку (годен или не годен) без приведения количественных оценок, что, естественно, снижает достоверность оценок, служащих для корректировки МПИ (п. Б.2, Б.3 РМГ). Из этого следует вывод, что для корректной оценки и корректировки МПИ следует использовать количественные оценки, зафиксированные в протоколах поверок (метод по п. Б.1 РМГ). Основа этого метода заключается в том, чтобы методом последовательных приближений рассчитать вероятность метрологической исправности конкретной МХ в каждой проверяемой точке диапазона в конкретный момент времени. В конечном итоге в качестве МПИ для СИ принимают минимальный из полученных МПИ.

Дополнительно можно отметить, что РМГ предлагает использовать в том числе подход к назначению МПИ через минимизацию совокупных затрат на поверку и вынужденный простой СИ и издержек от недостоверных результатов измерений (экономические потери при эксплуатации метрологически отказавшего СИ). Однако обычно исходных данных для получения достоверного МПИ и однозначного и корректного решения задачи, как правило, недостаточно, что обуславливает тот факт, что данный метод практически не встречается на практике. Тем не менее БелГИМ рассматривает такие расчеты как обязательные для назначения МПИ в СЗМ для СИ учета энергоресурсов. Это обу-

словлено большим количеством эксплуатируемых в данной сфере средств измерений и финансовые издержки на «оборот» подлежащих поверке средств измерений может быть сопоставим с их полной заменой. Например, поверка водосчетчиков предполагает проведение их предварительного техобслуживания и ремонта, стоимость которых может достигать до половины стоимости нового прибора.

В заключение еще раз подчеркнем, что расчет МПИ по РМГ 74 выполняется в отношении средств измерений независимо от сферы их применения и является гарантией изготовителя по сохранению рабочих характеристик при соблюдении условий эксплуатации. Данный МПИ нельзя использовать для применения в сфере государственного регулирования даже при наличии тщательных исследований, поскольку обеспечить минимальные риски при эксплуатации средств измерений можно только частотой их контроля.

Приведенная в докладе информация является частью масштабной работы по подведению теоретической базы для оценки межповерочных/межкалибровочных интервалов и касается только первичных интервалов, назначаемых для вновь разрабатываемых средств измерений или средств измерений для которых получить эксплуатационную статистику проблематично (средства измерений импортного производства). Продолжение данной исследовательской работы будет касаться оценки эксплуатационной метрологической надежности средств измерений в т. ч., учитывающий риски, связанные с их применением в сфере законодательной метрологии.

### Литература

1. Закон Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХП «Об обеспечении единства измерений», 2014.
2. Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь № 17 от 16.03.2007 «Об утверждении перечня областей в сфере законодательной метрологии».
3. Решение Научно-технической комиссии по метрологии (НТК) Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 03.10.2017 № 09-2017.
4. ТКП 8.001 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Государственные испытания средств измерений. Правила проведения работ».
5. РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».
6. ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения».
7. ГОСТ 27.003-2016 «Надежность в технике (ССНТ). Состав и общие правила задания требований по надежности».

8. Данилов А.А. Методы установления и корректировки межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений / А.А. Данилов // Главный метролог, 2005. – № 6. – С. 29–36.

9. С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. «Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств», Минск, БГУИР, 2010.

УДК 621.375

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАРТФОНОВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРИ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ ОБЪЕКТОВ

Шмигирёв Е.Ф.,<sup>1</sup> Юхник А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> ОУ Академия МВД Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Современный этап развития криминалистики характеризуется переосмыслением, уточнением и дополнением ряда положений теории криминалистики в соответствии последними тенденциями научно-технического прогресса. В криминалистической деятельности правоохранительные органы, активно используют автоматизированные информационные системы. Так на техническом вооружении Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь имеются автоматизированная дактилоскопическая идентификационная система (АДИС) «Дакто 2000» и экспертная автоматизированная система портретной идентификации «Портрет-2005». Данные системы позволяют формировать базы данных и вести в них оперативный поиск устанавливаемых лиц по имеющимся материалам. Базы данных формируются в большей степени из объектов, являющихся персональными данными лиц, отбор которых, регламентирован законом и требует определенного времени. При этом возможны ситуации, когда объекты исследования принадлежат несовершеннолетнему, гражданину иностранного государства либо иной категории лиц, информация о которых отсутствует в базах данных. В данном случае срок рассмотрения материалов проверки либо уголовного дела может значительно увеличиться и потребует дополнительных материальных затрат в виду проверки и постановки на учет большого количества проверяемых лиц, а в ряде случаев данные факторы сводят вероятность успешного разрешения материалов к нулю.

С целью сокращения времени, затрачиваемого на проверку лиц для предварительного исследования объектов (дактилоскопические образцы, портретные изображения), а именно исключения этапа получения образцов, предлагается проводить предварительное исследование образцов в режиме реального времени непосредственно при взаимодействии сотрудника правоохранительных органов и проверяемого лица. Данная процедура стала возможной благодаря созданию многофункциональных мобильных средств компьютерной техники и смартфонов.

Современные смартфоны обладают значительной вычислительной мощностью, кроме этого, они оснащены различными рода датчиками, такими как акселерометр, гироскоп, датчик освещенности, сканеры отпечатков пальцев и др. Кроме того, факт наличия в каждом смартфоне камеры высокого разрешения практически вытеснил с рынка обычные цифровые фотоаппараты (беззеркальные). С повышением производительности процессоров и увеличением объема оперативной памяти мобильных устройств появилась возможность применять различные алгоритмы обработки и анализа сигналов в реальном времени. То есть, используя современный смартфон, сотрудник правоохранительных органов может провести предварительное исследование образцов посредством камеры в режиме реального времени, обрабатывая видеопоток и проводя сопоставление изображений, отображающих идентифицирующий и идентифицируемый объект. Данная возможность оперативного сравнения значительно повысит вероятность раскрытия преступлений («по горячим следам»). В настоящее время методики и алгоритмы проведения криминалистических исследований с использованием мобильных устройств и смартфонов отсутствуют.

Возможно применение в реальном масштабе времени фильтра Собела на информационном видеопотоке с разрешением в 840 на 840 пикселей со скоростью 22 кадра в секунду на мобильном устройстве, оснащенном процессором «Qualcomm Snapdragon 625 MSM8953» (8 ядер, ARMCortex-A53 2000 МГц + ARMCortex-A53 2000 МГц), графическим ускорителем «Adreno 506» (650 МГц), оперативной памятью объемом 4 Гб и операционной системой «Android 8.1 Oreo».

|   |    |   |
|---|----|---|
| 1 | 1  | 1 |
| 1 | -8 | 1 |
| 1 | 1  | 1 |

а)

|   |    |   |
|---|----|---|
| 0 | 1  | 0 |
| 1 | -4 | 1 |
| 0 | 1  | 0 |

б)

Рисунок 1 – Лапласиан с диагональными элементами (а), лапласиан без диагональных элементов (б)

Для повышения качества анализа при контрастном выделении границ использовались фильтр Собела и лапласиан на изображении папиллярных узоров пальцев рук. Свёртка матрицы лапласиана использовалась с диагональными элементами и без них.

Проблема использования фильтра Собела при сканировании папиллярных линий заключается в том, что он выделяет границы линий узора с обеих сторон, а это значительно искажает необходимые для восприятия элементы папиллярного узора.

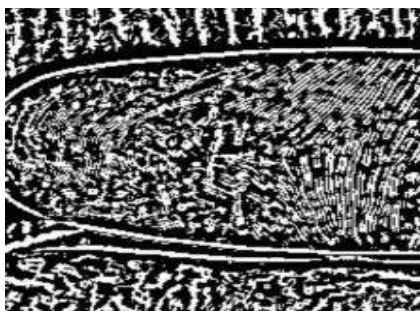


Рисунок 2 – Пример использования фильтра Собела при сканировании папиллярных линий

На картинке выше хорошо видно, как фильтр Собела «обводит» линию по контуру, скорее добавляя шум, чем полезную информацию, поэтому от данного фильтра решено было отказаться.

Оператор Лапласа, напротив, зарекомендовал себя с лучшей стороны в данном вопросе. Ниже (Рис. 3, 4) приведены две картинки для сравнения между лапласианом с и без диагональных элементов.

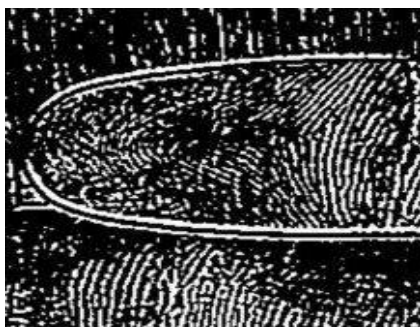


Рисунок 3 – Пример применения лапласиана без диагональных элементов при сканировании папиллярных линий

Стоит отметить, что перепад яркости между пикселями, во время съёмки папиллярных линий весьма невелик и результат сканирования очень сильно зависит от освещения объекта сканирования и фокуса используемой камеры.

Приведённые скриншоты сделаны на мобильном устройстве во время обработки видеопотока, содержащего полезную информацию. Устройство было зафиксировано, однако это не избавляет камеру от шума, который проявля-

ется в виде зернистости на видеопотоке, что затрудняет однозначную оценку качества того или иного фильтра.



Рисунок 4 – Пример применения лапласиана с диагональными элементами при сканировании папиллярных линий

Как видно из приведённых изображений: с одной стороны, добавление диагональных элементов в матрицу свёртки добавляет больше деталей на анализируемом изображении, а с другой стороны эти детали несут в себе сомнительное количество полезной информации, являясь, скорее, шумом. При этом лапласиан без диагональных элементов довольно точно игнорирует посторонние для поставленной задачи шумы, поэтому целесообразным является использование матрицы свёртки без диагональных элементов.

Данные результаты не абсолютны, так как тестирование большого количества различных устройств повлечёт значительных материальных затрат. Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что современные мобильные средства при достаточном быстродействии и оперативной памяти обеспечивают возможность проводить в реальном масштабе времени криминалистические исследования непосредственно по следам совершённого преступления, не прибегая к использованию специализированных лабораторий, что значительно ускоряет процесс расследования. Вместе с тем смартфоны доминируют среди пользователей мобильной связи, а, следовательно, их использование позволит сократить затраты на разработку и производство специальных средств.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали хорошие перспективы использования возможностей смартфонов в криминалистической деятельности для предварительного исследования объектов.

### Литература

Дактилоскопия и дактилоскопическая экспертиза: учебное пособие / И.А. Анищенко, В.Е. Воробей, Н.В. Ефременко, В.А. Чванкин; под ред. И.А. Анищенко. – Минск : Акад. МВД Респ. Беларусь, 2014. – 119 с.

УДК 537.811.088.22:621.396.67(045)(476)

**ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ЭТАЛОННЫХ АНТЕНН НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НЭ РБ 26-15 МЕТОДОМ ТРЕХ АНТЕНН**  
**Вольнец А.С.**

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

Реализация метода трех антенн основана на формуле передачи электромагнитной энергии в свободном пространстве, в соответствии с которым для системы с двумя антеннами (излучающей и приемной), расположенных на некотором расстоянии друг от друга, можно записать уравнение [1]:

$$S_{ИА} \cdot S_{ПА} = \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_{ПА}}{P_{ИА}} \quad (1)$$

где  $S_{ИА}$  - эффективная площадь излучающей антенны, м<sup>2</sup>;  $S_{ПА}$  - эффективная площадь приемной антенны, м<sup>2</sup>;  $P_{ПА}$  - мощность на выходе приемной антенны, Вт;  $P_{ИА}$  - мощность, подведенная к излучающей антенне, Вт;  $\lambda$  - длина волны, м;  $r$  - расстояние между антеннами, м [1].

На практике при реализации метода трех антенн измеряется мощность при непосредственном подключении преобразователя измерителя мощности к генератору ( $P_{Г}$ ) и мощность при его подключении к приемной антенне ( $P_{ПА}$ ) при условии поддержания постоянной мощности на выходе генератора.

При непосредственном подключении генератора и измерителя мощности, поглощенная измерителем мощности мощность с учетом рассогласования в сверхвысокочастотном (далее - СВЧ) измерительном тракте будет равна

$$P_{Г} = P_{ГП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{П}|^2}{(1 - |\Gamma_{Г}|^2)(1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (2)$$

где  $P_{ГП}$  - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности на выходе генератора;  $P_{Г}$  - действительное значение мощности сигнала на выходе генератора с учетом рассогласования;  $\Gamma_{Г}$  и  $\Gamma_{П}$  - комплексные коэффициенты отражения высокочастотного выхода генератора и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности [1].

Мощность, поступающая в излучающую антенну при подключении ее к генератору равна

$$P_{ИА} = P_{Г} \cdot \frac{(1 - |\Gamma_{Г}|^2)(1 - |\Gamma_{ИА}|^2)}{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2} \quad (3)$$

где  $P_{ИА}$  - действительное значение мощности сигнала, поданное на излучающую антенну с учетом рассогласования;  $\Gamma_{ИА}$  - комплексный коэффициент отражения излучающей антенны.

Подставляя (3) в (2) получим

$$P_{ИА} = P_{ГП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{ИА}|^2)}{|1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (4)$$

Мощность, поглощенная термоэлектрическим преобразователем на выходе приемной антенны с учетом рассогласования в СВЧ тракте равна

$$P_{ПА} = P_{ПП} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{ПА} \Gamma_{П}|^2}{(1 - |\Gamma_{ПА}|^2)(1 - |\Gamma_{П}|^2)} \quad (5)$$

где  $P_{ПП}$  - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем на выходе антенны;  $P_{ПА}$  - действительное значение мощности сигнала на выходе антенны;  $\Gamma_{ПА}$  - комплексный коэффициент отражения приемной антенны.

Подставив (4) и (5) в (1) получим:

$$S_{ИА} \cdot S_{ПА} = \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_{ПП}}{P_{ГП}} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{ПА} \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{ИА}|^2}{(1 - |\Gamma_{ПА}|^2) \cdot |1 - \Gamma_{Г} \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{ИА}|^2)} \quad (6)$$

Поскольку уравнение содержит две неизвестные, при проведении измерений вводят третью вспомогательную антенну и выполняют три серии измерений. Уравнения измерений запишутся в виде:

$$\begin{aligned} S_1 \cdot S_2 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{(1 - |\Gamma_2|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_1|^2)} \\ S_1 \cdot S_3 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_3}{P_1} \cdot \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{(1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_1|^2)}; \quad (7) \\ S_2 \cdot S_3 &= \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2}{(1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_2|^2)}. \end{aligned}$$

Решив систему уравнений, найдем искомые эффективные площади каждой из трех антенн:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}} \cdot M_1 \\ S_2 &= \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}} \cdot M_2 \\ S_3 &= \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12}} \cdot M_3, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $R_{ij} = \lambda \cdot r \cdot \sqrt{\frac{P_j}{P_i}}$ ;  $P_j$  - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем на выходе антенны  $P_{ПП}$  в каждой из серий измерений, Вт;  $P_i$  - мощность, принятая термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности на выходе генератора  $P_{ГП}$  в каждой из серий измерений, Вт.

Поправочные множители на рассогласование в СВЧ измерительном тракте будут равны:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2| \cdot (1 - |\Gamma_1|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}|} \\ M_2 &= \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}| \cdot (1 - |\Gamma_2|^2)} \\ M_3 &= \frac{|1 - \Gamma_3 \Gamma_{П}|^2 \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|}{(1 - |\Gamma_3|^2) \cdot |1 - \Gamma_1 \Gamma_{П}| \cdot |1 - \Gamma_2 \Gamma_{П}|} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Gamma_1$ - комплексный коэффициент отражения первой (излучающей) антенны;  $\Gamma_2$ - комплексный коэффициент отражения второй (вспомогательной) антенны, используется в качестве излучающей и приемной в разных сериях измерений;  $\Gamma_3$ - комплексный коэффициент отражения третьей (приемной) антенны.

#### Оценивание неисключенной систематической погрешности результатов измерений эффективной площади методом трех антенн

При расчете неисключенной систематической погрешности примем во внимание следующие составляющие: погрешность измерения отношения мощностей измерителем мощностей; погрешности, обусловленные рассогласованием в СВЧ измерительном тракте, непостоянством электромагнитного поля за время измерений, неидеальностью настройки антенн по поляризации, неидеальностью поляризационных характеристик антенн, неточностью позиционирования антенн, переотражением электромагнитных волн от стен камеры, изменением характеристик СВЧ кабеля при изгибании, неидеальностью соединений СВЧ тракта (повторяемость СВЧ соединений при переключении антенн).

Поскольку при реализации метода трех антенн в каждой серии эксперимента выполняется измерение отношения мощностей сигналов, частотной составляющей погрешности измерителя мощности можно пренебречь. Градуировка термоэлектрических преобразователей из состава Национального эталона единицы плотности потока энергии НЭ РБ 26-15 выполнена непосредственно на оборудовании Национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний, границы относительной погрешности измерения отношения мощностей сигналов составят не более  $\pm 1,2\%$ .

При реализации метода трех антенн, так или иначе, присутствует погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте. Поскольку в нашем случае целью эксперимента является определение эффективной площади приемной антенны из состава эталона (третья антенна в серии измерений), определим значение погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте при определении эффективной площади третьей антенны. Принимая равномерный закон распределения модулей коэффициента отражения, для доверительной вероятности  $P=0,95$  погрешность из-за рассогласования в СВЧ тракте  $\delta$ , отн. ед., можно оценить по формуле:

$$\delta = \pm 1,1 \cdot \sqrt{\frac{|\Gamma_3|^4 + 4 \cdot |\Gamma_3|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + 4 \cdot |\Gamma_2|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_2|^2 + 4 \cdot |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2}{|\Gamma_{\Pi}|^4 + 4 \cdot |\Gamma_3|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2 + |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_2|^2 + 4 \cdot |\Gamma_{\Gamma}|^2 |\Gamma_{\Pi}|^2}}$$

Принимая значения модулей коэффициентов отражения равными  $|\Gamma_{\Pi}| \leq 0,1$ ;  $|\Gamma_{\Gamma}| \leq 0,1$ ;  $|\Gamma_3| \leq$

0,2 значение погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте составит не более  $\pm 9\%$ , что значительно превышает любую из составляющих погрешности, поэтому реализация метода трех антенн без применения корректирующего множителя является неприемлемым.

Тем не менее, использование корректирующего множителя не позволяет полностью исключить погрешность из-за рассогласования в СВЧ тракте, поскольку существует погрешность в измерениях значений действительной и мнимой частей коэффициентов отражения компонентов СВЧ тракта. Эта погрешность содержит как случайную составляющую из-за случайных эффектов в соединении устройств, так и неисключенную систематическую погрешность, возникающую из-за погрешности измерения коэффициентов отражения векторным анализатором цепей. Опыт показал, что случайная погрешность в реальной или мнимой частях коэффициента отражения антенны с прецизионным соединителем вряд ли превысит  $\pm 0,7\%$  при условии, что антенна направлена на соответствующий радиопоглощающий материал во время измерений. Принимая в расчетах погрешность измерения модулей и аргументов комплексных коэффициентов отражения векторным анализатором цепей, равную  $\pm 5\%$ , неисключенная систематическая погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте после применения поправочного множителя не превысит  $\pm 0,8\%$ . Анализ показал, что использование поправочного множителя с учетом модулей комплексных коэффициентов отражения позволяет снизить погрешность из-за рассогласования в 1,5 – 2,5 раза, с учетом комплексных коэффициентов отражения – в 9-10 раз [2].

Приведенная методика предполагает [1], что используемые при измерениях передающая и приемная антенны линейно поляризованы и большие оси их поляризационных эллипсов настроены друг на друга. На практике лабораторные антенны не будут полностью линейно поляризованными, а большие оси их поляризационных эллипсов не будут идеально выровнены. Чтобы оценить погрешность из-за неидеальности поляризационных характеристик антенн, можно использовать следующее уравнение для определения эффективности соответствия поляризации  $L$ :

$$L = \frac{(1+r_{\text{ИА}}^2)(1+r_{\text{ПА}}^2)+4 \cdot r_{\text{ИА}} \cdot r_{\text{ПА}}+(1-r_{\text{ИА}}^2)(1-r_{\text{ПА}}^2) \cdot \cos \Delta}{2 \cdot (1+r_{\text{ИА}}^2) \cdot (1+r_{\text{ПА}}^2)}, \quad (10)$$

где  $r_{\text{ИА}}$  – коэффициент эллиптичности излучающей антенны;  $r_{\text{ПА}}$  – коэффициент эллиптичности приемной антенны;  $\Delta$  - половина угла между большими осями поляризационных эллипсов антенн.

В случае, когда излучающая и приемная антенны имеют идеальную линейную поляризацию, т.е.  $r_{\text{ИА}} \rightarrow \infty$  и  $r_{\text{ПА}} \rightarrow \infty$ , получим:

$$L = \frac{1+r^2-(1-r^2)\cos\Delta}{2\cdot(1+r^2)}, \quad (11)$$

где  $r$  – максимальный из коэффициентов эллиптичности антенн.

Из (12) видно, что  $r \rightarrow \infty$  и  $L \rightarrow \cos\Delta$ . Это ожидаемо, поскольку в данном случае обе антенны совершенно линейно поляризованными и единственным несоответствием является несоосность эллипсов поляризации. Принимая во внимание, что  $\cos\Delta = 2\cos^2\Phi - 1$ , запишем (12) в виде:

$$L = \cos^2\Phi, \quad (12)$$

где  $\Phi$  – угол между большими осями поляризационных эллипсов излучающей и приемной антенн.

Поворотное устройство эталона позволяет позиционировать антенны с точностью  $1^\circ$ , тогда погрешность из-за несоосности поляризационных эллипсов составит не более  $\pm 0,1\%$ .

Теперь рассмотрим тот факт, что лабораторные антенны не являются, по сути, совершенно линейно поляризованными. **Погрешность из-за нелинейности поляризационных характеристик антенн** можно оценить по формуле (11), оценив сначала коэффициенты эллиптичности антенн. Коэффициент эллиптичности любой из антенн может быть получен путем нахождения отношения максимального принимаемого сигнала к минимально принятому сигналу, когда приемная антенна вращается вокруг своей оси [3]. Антенны из состава эталона имеют коэффициент эллиптичности порядка 30 дБ, тогда погрешность из-за нелинейности поляризационных характеристик антенн не превысит  $\pm 0,4\%$ .

Все кабели, используемые при проведении измерений, испытывают некоторые изгибы, в результате которых изменяются их характеристики, что в свою очередь приводит к **погрешности из-за изгибания кабелей**. В приемном тракте термоэлектрические преобразователи измерителя мощности подключаются непосредственно фланцем приемной антенны, от которых к измерительному блоку по кабелям идут сигналы постоянного тока. Таким образом, указанная погрешность возникает прежде всего в передающем тракте, где имеет место подключение излучающей антенны к генератору сигналов посредством коаксиального фидера. Эффект такого типа изгиба кабеля можно легко оценить, включив его в тракт векторного анализатора цепей, сгибая кабель в той же степени, что и на практике, и сравнивая спектрограммы векторного анализатора цепей. Практика показывает, границы относительной погрешности из-за изгибания кабеля, как правило, составляют не более  $\pm 0,2\%$ .

Хотя болты, используемые для прикрепления каждой антенны к соответствующему волноводу, находятся близко друг к другу, так или иначе существует какое-либо провисание, а крутящий

момент, приложенный к этим болтам, редко бывает одинаковым. Эти факторы приводят к погрешностям **из-за неидеальности соединений компонентов СВЧ тракта**. Аналогичным образом для коаксиальных систем возможны изменения в способе соединения, что приводит к незначительным различиям в потерях, возникающих в местах соединений. Как и с погрешностью из-за изгибания кабеля, возникающая погрешность может быть оценена путем выполнения повторных подключений и отключений во время измерения, и, как правило, не превышает  $\pm 0,2\%$ .

Используемый в расчетах полином (8) предполагает, что единственные сигналы, достигающие приемной антенны, поступают непосредственно от излучающей антенны. Хотя модель и включает в себя эффект множественных переотражений между самими антеннами, она не учитывает какие-либо переотражения от поглотителя внутри камеры. Эти отражения будут приводить к погрешностям в измеренном значении эффективной площади. При этом значение **погрешности из-за переотражений** определяется коэффициентом безэховости камеры. Существуют различные способы определения коэффициента безэховости камеры: метод КСВН, метод наложения диаграмм направленности, метод двух приемных антенн и др. [4]. Нами был использован метод, основанный на перемещении излучающей изотропной антенны в объеме камеры, определении КСВН камеры в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 с последующим пересчетом полученных результатов в коэффициент безэховости камеры. Для этих целей использован специальный комплект изотропных антенн и позиционер. Измеренное значение коэффициента безэховости составило  $-(30...40)$  дБ, что с учетом малого измерительного расстояния в камере является достаточным для проведения измерений с погрешностью из-за переотражений в безэховой камере порядка 1-2%.

Нестабильность электромагнитного поля за время проведения измерений определяется в первую очередь характеристиками используемого генератора сигналов и наличием внешних электромагнитных помех. Кратковременная нестабильность уровня выходной мощности генератора сигналов из состава эталона составляет 0,01 дБ за 15 минут работы. С учетом того, что измерения выполняются в экранированной безэховой камере, исключающей попадания внешних электромагнитных полей, **погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля** за время измерений не превысит 0,3% [5].

**Погрешность из-за неточности позиционирования антенн** определяется характеристиками используемого координатного устройства. Можно выделить три типа ошибок позиционирования антенн, которые приводят к погрешности в измеренном значении эффективной площади: угловая



несоосность, возникающая при вращении антенны вокруг любой оси, нормальной к направлению измерения, боковое смещение, возникающее при боковом смещении антенны относительно направления измерения, и неточность установки расстояния между антеннами. Следует отметить, что не каждая ошибка в позиционировании антенны приведет к погрешностям результатов измерений. Так, например, неточность позиционирования антенны 1 не влияет на точность измерения эффективной площади антенны 3, если она не меняла положения между запусками антенн 1-2 и антенн 1-3. Это связано с тем, что несогласованная антенна 1 может рассматриваться как идеально выровненная антенна, но с другой эффективной площадью, и значение этой эффективной площади взаимовычитается в уравнении для вычисления эффективной площади антенны 3. Измерения, в целом, конечно, приведут к неправильному значению эффективной площади антенны 1, но если это не является целью измерения, то это может быть приемлемым. Значение погрешности из-за неточности позиционирования антенн несложно найти, проведя серию экспериментальных исследований. С учётом того, координатное устройство эталона позволяет позиционировать антенны с точностью  $\pm 1^\circ$  (вокруг оси и по азимуту) и  $\pm 1$  мм (расстояние между антеннами и боковое перемещение), значение погрешности из-за неточности позиционирования антенн не превысит  $\pm 1,0\%$ .

Границы неисключенной систематической погрешности при определении эффективной площади антенны по предложенной методике составляют  $\pm 2,3\%$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

#### **Заключение**

Предложенный метод коррекции результатов измерений эффективной площади методом трех

антенн основан на использовании поправочного множителя, рассчитанного по результатам измерений комплексных коэффициентов отражения компонентов СВЧ измерительного тракта. Анализ показал, что это позволяет уменьшить составляющую погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте в 10 раз, а погрешность метода трех антенн в целом более чем в 5 раз. Основным достоинством предложенного метода трех антенн с учетом поправочного множителя является высокая точность результатов измерений и отсутствие необходимости использования эталонных антенн. Основным недостатком является сложность его реализации, необходимость выполнения дополнительных измерений для расчета поправочного множителя.

#### **Литература**

1. IEEE Std 149™-1979 (R2008) (Revision of IEEE Std 149-1965) IEEE Standard Test Procedures for Antennas – 129 с.
2. Волынец А.С., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте // Метрология и приборостроение.- 2017.- №1
3. А.С. Волынец, А.В. Гусинский. Калибровка антенн с круговой поляризацией с использованием линейно поляризованных эталонных антенн // Метрология и приборостроение.- 2015.- №1
4. Беззховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмахер, В. А. Торгованов, 129 с. ил. 21 см., М. Радио и связь 1982.
5. Мелехов М.Е., Иващенко П.А.. Поверка средств измерений напряженности электромагнитного поля. Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1986 г.

**Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

УДК 621.38

**ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ РЕОГРАФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА**

Батурин А.П., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Наибольшее число летальных исходов в мире связаны с заболеваниями сердца и кровеносной системы. Для эффективной оценки функционального состояния системной гемодинамики требуется разработки новых IT-технологий диагностики, лечения и прогнозирования состояния организма. Отсюда разработка совершенных методов исследований, обеспечивающих эффективную диагностику функционального состояния сердечно-сосудистой системы, является крайне актуальной и заключается в поиске доступных для широкого применения новых методов и показателей количественного определения интенсивности кровоснабжения [1]. В настоящее время функциональная диагностика использует прямые и косвенные методы оценки состояния сердечно-сосудистой системы [2].

Реография сосудистого кровотока интенсивно используется в клинической практике для количественного анализа значений параметров сердца и сосудистой системы [1, 2]. Однако на достоверность полученных реограмм влияют внешних факторов – температура среды, электромагнитные поля и акустические колебания.

Оценке влияния на действительные значения параметров реограмм в среде действия ультразвуковых колебаний посвящена данная работа. Экспериментально исследованы колебания реографические показатели под действием ультразвука.

В описание реограмм включают оценку уровня кровенаполнения сосудов исследуемой зоны, оценку значений тонуса на уровне артерий распространения, оценку эластичности сосудов, уровня периферического сопротивления и состояния венозного оттока.

Для оценки уровня кровенаполнения обычно используется амплитудная и частотная составляющая реосигнала.

Для более предметного дальнейшего рассмотрения остановимся на простейшей модели участка тела, например верхней конечности, при продольной реографии.

Представим простейшую модель участка тела в виде четырех параллельно соединенных резисторов, один из которых моделирует сопротивление магистральных артерий при диастолическом давлении  $R_d$ . Переменное сопротивление связанное с изменением диаметра сосудов  $\bar{R}_d$ ,

сопротивление тканей  $R_T$ , сопротивление изменяющееся в результате действия ультразвуковых колебаний  $R_y$ .

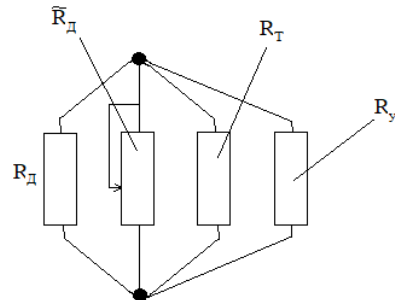


Рисунок 1 – Модель измеряемого участка тела человека

Изменение сопротивления для кровотока вычисляется из соотношения:

$$R_A = \rho_k \frac{L_A}{S_A}, \text{ где } \rho_k - \text{удельное сопротивление}$$

крови,  $L_A$  – длина участка тела между потенциальными электродами,  $S_A$  – площадь поперечного сечения артерии, - сопротивление, возникающее в результате действия ультразвуковых полей.

При такой модели амплитуда реографического сигнала будет равняться разнице итогового сопротивления (т. е. сопротивление четырех параллельно соединенных резисторов) при диастолическом давлении  $R_d$  и результирующее сопротивление при систолическом давлении  $R_C$ .

$$\partial R_{Amax} = [(R_d - R_C) \cdot k_{энт}] = \left( \frac{\rho_k^2 L_A \partial S_{Amax}}{\rho_k S_T^2} \right) \cdot k_{y.энт} \quad (1)$$

Как видим, амплитуда реосигнала действительно определяется величиной максимального изменения поперечного сечения артерии  $\partial S_{Amax}$ ,  $\partial R_{Amax}$  изменение сопротивления реографического сигнала, а значит, кровенаполнение, но, кроме этого, она зависит от расстояния между потенциальными электродами  $L_A$ , эластичности и тонуса артерии (так как  $\partial S_{Amax}$ , зависит от эластичности и тонуса тоже), зависит от квадрата поперечного сечения тела  $S_T^2$ , зависит от сердечного выброса и от коэффициента влияния ультразвука  $k_{y.энт}$ .

Тогда изменения сечения артерии пропорциональна изменения сопротивлений умноженный на коэффициент влияния ультразвука:

$$\frac{\partial S_{A_{\max}}}{S_T} = \frac{\partial R_{A_{\max}}}{R_{ZA}} \cdot k_{y_{\text{впл}}} \quad (2)$$

Очевидно, что кровоснабжение региона должно определяться массой тканей этого региона, поэтому изменения сечения площади  $\partial S_{A_{\max}}$ , на  $S_T$  можно рассматривать как попытку приведения  $\partial S_{A_{\max}}$  до какого-то стандарта для уменьшения зависимости от конкретной области установки электродов,  $k_{y_{\text{впл}}}$  – коэффициент влияния ультразвука.

Для оценки эластичности свойств рассмотрим простейшую модель исследуемого участка сосудистой системы, в которой эластичные свойства большой артерии отобразим в виде некоторой емкости  $C_1$ , инерционность массы крови между артерией и следующими средними и мелкими артериями представим в виде индуктивности  $L_{KP}$ , эластичные свойства средних и мелких артерий – представим в виде емкости  $C_2$ , и, наконец, периферическое сопротивление – в виде некоторого активного сопротивления  $R_{\text{пер}}$ . Обозначим СОК – систолический объем кровотока за период  $T$ .

Для определения параметра СОК можно использовать либо методику сжатия вены и оценки прироста кровенаполнения вены за период, или совместную обработку реосигналов исследуемой артерии и аорты.

Для определения параметра СОК с учетом влияния ультразвука на систолический объем кровотока введем параметр коэффициента влияния ультразвука  $k_{y_{\text{впл}}}$  тогда:

$$\text{СОК} = y \frac{p_k L^2 \partial R_{\text{СОК}}}{R_z^2} \cdot k_{y_{\text{впл}}} \quad (3)$$

$L$  – расстояние между потенциальными электродами;  $\partial R_{\text{СОК}}$  – прирост сопротивления между потенциальными электродами при пережиме вены за период;  $R_{ZA}$  – базовое сопротивление, соответствующее моменту определения значения  $R_{\text{СОК}}$ ;  $y$  – коэффициент, учитывающий соотношение полного объема исследуемого участка сосудистой системы и объема между потенциальными электродами;  $k_{y_{\text{впл}}}$  – коэффициент влияния ультразвука.

УДК 621.382

## СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОвого СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ С НИТЕВИДНЫМИ И SMD ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС), основанном на анализе переходных электрических процессов, связанных с разогревом полупроводникового прибора собственным током, исследована струк-

тура теплового сопротивления светодиодной (СД) лампы (~ 4 Вт) с нитевидными излучателями, а также стандартной SMD (surface-mount device) лампы (~ 4 Вт) с поверхностным монтажом светодиодов (рисунок 1). Колба лампы с нитевид-

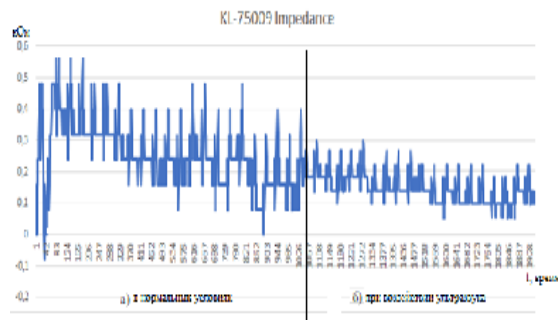


Рисунок 2 – Реограммы а) без влияния ультразвука б) с влиянием ультразвука

В результате исследований установлено, что при воздействии ультразвука терапевтических интенсивностей меняется скорость кровотока, кровенаполнение органов, пульс. На рис. 2 показана реограммы в нормальных условиях и реограммы при воздействии ультразвука. Установлены изменения параметров реограмм по амплитуде та частоте.

На основе проведенных экспериментов динамика изменения сопротивления кровотока участка руки, под воздействием ультразвука изменяется более чем на 2 %, по сравнению с реограммами без внешнего воздействия ультразвука.

### Литература

1. Ультразвуковые физиотерапевтические аппараты и устройства: монография / Терещенко Н.Ф., Тимчик Г.С., Чухраев М.В., Кравченко А.Ю. Киев : КПИ им. Игоря Сикорского, Издательство «Політехніка», 2018. – 184 с.
2. Батурич А.П., Терещенко Н.Ф. Влияние ультразвука на изменения реографических характеристик // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студ. 18-20 апреля 2018 г. / Минск, БНТУ, 2018. – 497 с., С. 7.

ными излучателями заполнена инертным газом (гелием) с высокой теплопроводностью. Измерения тепловых параметров SMD лампы выполнены без светового диффузора. В рамках метода ТРДС получены также профили растекания теплового потока по элементам лампы.

ТРДС метод, а также релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов, на котором проведены измерения, разработаны в Белорусском национальном техническом университете и успешно применены для анализа мощных транзисторов, светодиодов, гетеролазеров. Подробное описание ТРДС метода приведено в работах [1–3], импеданс спектрометра – в работе [2].

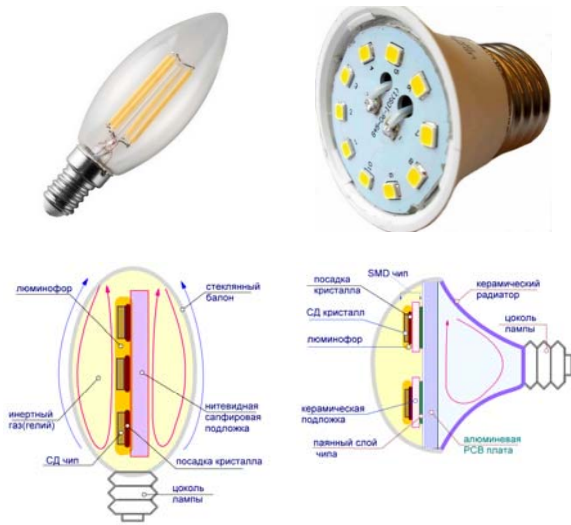


Рисунок 1 – Внешний вид исследуемых ламп с нитевидными и SMD излучателями и их схематическая структура

На рисунке 2 приведены зависимости температуры перегрева SMD лампы и лампы с нитевидными излучателями от времени. Видно, что через 5 с после включения начинается существенный разогрев излучателя SMD лампы, причем для достижения стационарного режима требуется более часа, что существенно больше чем для лампы с нитевидными излучателями. Это можно объяснить наличием у SMD лампы керамического радиатора, значительно увеличивающего ее тепловую инерцию. Температура перегрева SMD лампы достигает 61°C, что соизмеримо с температурой лампы с нитевидными излучателями (58°C). При кратковременном включении, в интервале 5-500 с, перегрев излучателя нитевидной больше чем SMD лампы, а при более длительном включении SMD лампа разогревается больше.

Непрерывные, а также дискретные (полученные в рамках модели Кауера) ТРДС спектры ламп (т.е. зависимости тепловых сопротивлений элементов структуры ламп от времен их тепловой релаксации, представляющих произведения их тепловых сопротивлений на теплоемкости) показаны на рисунках 3, 4. Там же указана иден-

тификация элементов структуры ламп, влияющих на теплоотвод.

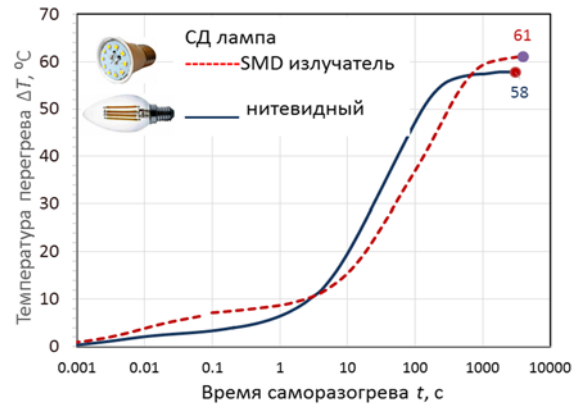


Рисунок 2 – Зависимости температуры перегрева лампы с нитевидными излучателями и SMD лампы от времени

На рисунке 3 выделены 5 основных компонент структуры светодиодной лампы с нитевидными излучателями, определяющих полное тепловое сопротивление исследуемого образца – СД кристалл, посадка кристалла, нитевидная подложка, тепловые сопротивления растекания в газовой среде в колбе лампы и во внешнюю среду. Растекание тепла в лампе через люминофор, как правило, не существенно и при анализе не учитывалось.

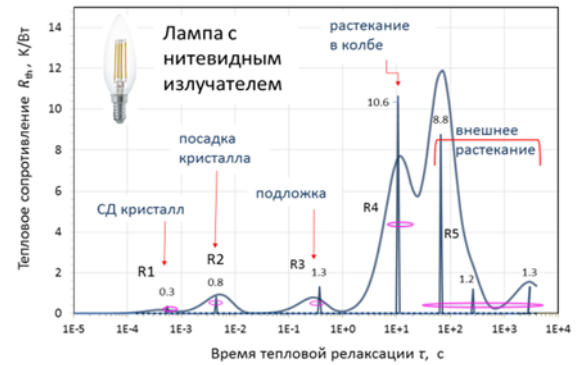


Рисунок 3 – Спектр тепловых сопротивлений лампы с нитевидными излучателями

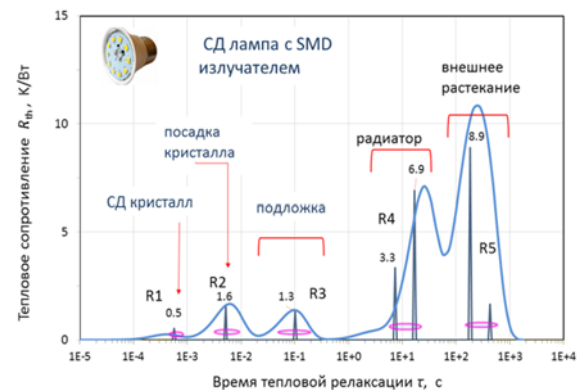


Рисунок 4 – Спектр тепловых сопротивлений SMD лампы

Дискретизация ТРДС спектров SMD лампы производилась (рисунок 4) аналогично как для нитевидной лампы. Анализ спектров данной лампы показывает существенный вклад радиатора (R4, R5) в тепловое сопротивление лампы.

На рисунке 5 показана эффективная площадь растекания теплового потока в обоих типах ламп при распространении тепла от кристаллов СД в окружающую среду. Из рисунка 5 видно, что в начальной области ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  с) тепловое растекание нитевидного излучателя более эффективно чем SMD, за счет его большей площади, далее в диапазоне 0,1-1 с растекание теплового потока определяется параметрами керамической подложки и РСВ платы в SMD лампе и сапфировой подложки в нитевидной лампе, далее (1-100 с) при растекании тепла, за счет конвекции внутри колбы, возникает сужение эффективной площади теплового потока в виде характерного “бутылочного горлышка”, что свидетельствует о наличии зон неравномерного нагрева в РСВ плате и сапфировой подложке. Для времен нагрева более  $10^2$  с (внешнее растекание) растекание тепла происходит более эффективно в лампе с нитевидными излучателями.

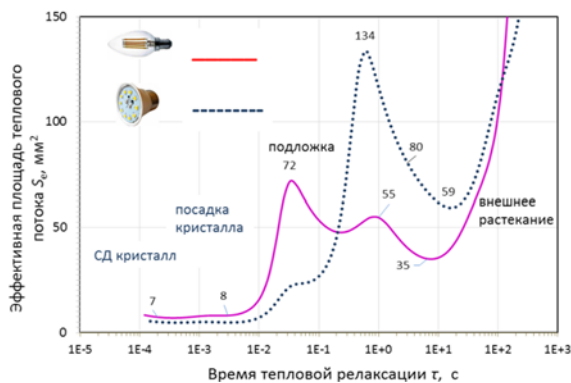


Рисунок 5 – Распределение эффективной площади сечения теплового потока по элементам структуры обоих типов ламп

Необходимо также отметить, что при удалении стеклянной колбы лампы с нитевидными излучателями или ее деградации, приводящей к замене гелия воздухом, резко возрастает тепловое сопротивление R4 и еще больше уменьшается площадь теплового потока в области R4 из-за гораздо более низкой теплопроводности воздуха.

Таким образом, методом ТРДС исследованы структура тепловых сопротивлений и профили растекания теплового потока в светодиодных лампах различных типов – достаточно эффективной лампе с нитевидными излучателями и, для сравнения, стандартной SMD лампе. Установлен вклад в полное тепловое сопротивление и в профиль растекания теплового потока каждого из элементов структуры ламп. Показано, что метод ТРДС позволяет подробно исследовать особенности тепловой конструкции сложных светодиодных приборов с целью снижения их перегрева.

### Литература

1. Vaskou, A.S. Diagnostics of the technological characteristics of high-power transistors using relaxation impedance spectrometry of thermal processes / A.S. Vaskou [et al.] // Russian Microelectron. 2015. Vol. 44, No. 8. P. 579–584.
2. Васьков, О.С. Метод тепловой релаксационной спектроскопии и определение параметров светодиодов / О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс // Докл. БГУИР. – 2011. – № 4. – С. 74–79.
3. Bumai, Yu.A. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko // Metrology and Measurement Systems. – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 39–46.
4. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.

УДК 535.2:535.361:53.043

## МОНТЕ-КАРЛО СИМУЛЯЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОСВЕТЛЕНИИ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА Вириченко А.А., Безуглая Н.В.

Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Применение оптических методов для визуализации неоднородностей в различных слоях биологических тканей (БТ), имеет ряд преимуществ по сравнению, например, с визуализацией тканей и структур рентгеновскими или магнитно-резонансными методами. В частности, это простота реализации, безопасность и низкая стоимость [1]. Благодаря последним достижениям оптики, динамично развиваются также техноло-

гии лазерной хирургии и оптической томографии [2].

Однако важной проблемой при реализации этих методов остается транспорт зондирующего излучения в биологическую ткань. Эти трудности связаны со сложным характером взаимодействия излучения с тканью и обусловлены ее оптической неоднородностью, а именно разницей показателей преломления структурных компо-

нентов. При этом возникает значительное рассеяние излучения, особенно для спектральных диапазонов видимого и инфракрасного излучения, которое негативно влияет на глубину проникновения и разрешение при проведении многих оптических исследований.

Наиболее эффективным решением этой проблемы является метод «оптического просветления», который позволяет управлять оптическими параметрами БТ за счет замещения внутритканевой жидкости биосовместимым иммерсионным агентом. Поскольку данная жидкость обладает достаточно высоким показателем преломления, то при введении ее в внутритканевую жидкость БТ, происходит согласование показателей преломления рассеивателей и окружающей их среды. При этом рассеивание значительно уменьшается [1, 3], а глубина проникновения увеличивается от 1.2 раза до 35 раз в зависимости от метода визуализации, типа иммерсионного агента и длины волны [4].

В данной работе на основании модельного эксперимента получены результаты исследования влияния продолжительности оптического просветления на пространственное распределение оптического излучения, а именно на индикатрису рассеивания.

Моделирование пространственного распределения излучения в БТ проводилось на основании методики [5, 6] с использованием метода Монте Карло для тканей грудной части тела, которая была представлена четырьмя слоями (роговой слой, эпидермис, дерма, жировой слой) для модельного эксперимента *in vitro* и пятью (роговой слой, эпидермис, дерма, жировой слой, мышечная ткань) – для *in vivo*. Мышечная ткань обеспечит моделирование в условиях *in vivo* за счет того, что использованное излучение длиной 632,8 нм проникает в ткани кожи на глубину до 2 мм [4].

В условиях данного модельного эксперимента принято, что иммерсионный агент производил влияние на роговой слой, эпидермис и дерму. Поэтому, оптические параметры для жирового слоя и мышечной ткани не изменялись и были получены на основании работы [7]. В тоже время, наблюдались динамические изменения показателя рассеивания в роговом слое, эпидермисе, дерме в зависимости от времени просветления [7].

Моделирование производилось для просветления тканей от 0 до 120 мин с шагом в 10 мин. Согласно методики [8, 9] получены графики индикатрис рассеивания для четырехслойной и пятислойной модельных тканей грудной части тела, которые представлены на рис. 1 и рис. 2, соответственно.

Из этих рисунков видно, что диффузное рассеяние вперед и назад практически не изменяется в процессе оптического просветления. Значительные изменения происходят в коллимирован-

ном отражении и пропускании четырехслойной среды. Для их оценки построены графики зависимости средних значений коллимированного пропускания и отражения от времени просветления, которые показывают, что коллимированное отражение после 30 мин просветления практически не изменяется. В тоже время, коллимированное пропускание возрастает по экспоненциальному закону примерно в 5 раз, что соответствует данным других авторов [4].

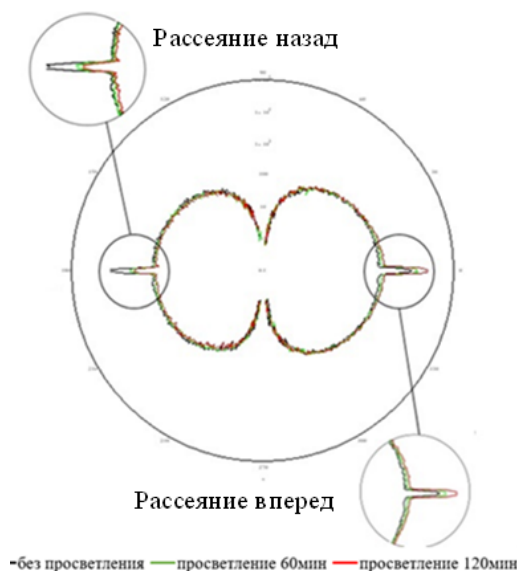


Рисунок 1 – Индикатриса рассеивания четырехслойной модельной тканью для различного времени просветления

Относительно рис. 2 можно сказать, что для пятислойной ткани присуще только рассеяние назад, причем просветление практически не влияет на коллимированное отражение.

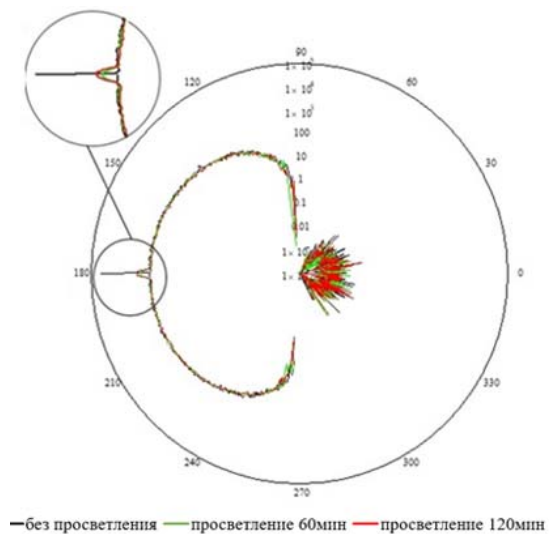


Рисунок 2 – Индикатриса рассеивания пятислойной модельной тканью для различного времени просветления

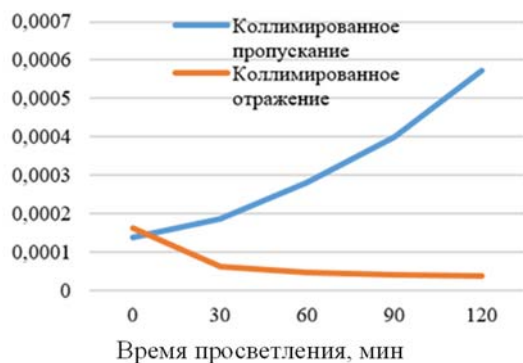


Рисунок 3 – Зависимость средних значений коллимированного пропускания и отражения от времени просветления для четырехслойной модельной ткани

Отсутствие коллимированного пропускания и не большие значения диффузного рассеивания вперед обусловлены тем, что излучение не проходит последний слой.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности применения метода пространственной фотометрии [8, 9] для определения степени просветления ткани, а также степени увеличения глубины проникновения.

#### Литература

- Генина Э.А. Оптическое просветление черепной кости многокомпонентными иммерсионными растворами и визуализация церебрального венозного кровотока / Генина Э.А., Башкатов А.Н., Семякина-Глушкова О.В., Тучин В.В. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2017. – № 17(2). – С. 98–110.
- Jhao-Ming Yu. Design for source-and-detector configuration of a ring-scanning-based near-infrared optical imaging system / Jhao-Ming Yu, Min-Cheng

Pan, Min-Chun Pan. // Optical Engineering. – 2014. – № 53. – С. 011002–1

3. A.N. Bashkatov Measurement of tissue optical properties in the context of tissue optical clearing / A.N. Bashkatov, Kirill V. Berezin, Konstantin N. Dvoretzkiy, Valery V. Tuchin, J. // Biomed. Opt. – 2018. – № 23(9). – С. 091416.

4. Генина Э.А. Управление оптическими свойствами биологических тканей : дис. докт. физ.-мат. наук : 03.01.02 / Генина Э.А. – Саратов, 2017. – 388 с.

5. Безугла Н.В. Вплив осевої анізотропії розсіяння біологічних середовищ на точність визначення оптичних коефіцієнтів методом Монте-Карло / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Г.С. Тимчик, К.П. Вонсевич // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015, № 1 (99). – С. 85–91

6. Bezuglyi M. On the Possibility of Ellipsoidal Photometry and Monte Carlo Simulation to Spatial Analysis of Biological Media / Bezuglyi M., Bezuglaya N., Viruchenko A. // IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2017. – С. 321–324.

7. И.В. Меглинский Квантовая электроника / И.В. Меглинский, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, Д.Ю. Чурмаков, В.В. Тучин / 2002 – № 10(32). – С. 875–882.

8. Безугла Н.В. Просторова фотометрія біологічних середовищ / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Г.С. Тимчик, В.А. Шаргородський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології – 2015. – № 2(30). – С. 40–49.

9. Безугла Н.В. Осьова анізотропія розсіювання біологічних середовищ / Н.В. Безугла // «Приладобудування: стан і перспективи»: тези доповіді. – К. : Політехніка, 2015. – С. 156–157.

УДК 535.2:616.71

### ОПТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАТОЛОГИЧЕСКИ ИЗМЕНЁННЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ЗЕРКАЛЬНЫХ ЭЛЛИпсоИДОВ ВРАЩЕНИЯ

Воронков Р.О., Безуглый М.А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Широко известно, что биологические ткани вследствие оптической неоднородности, избирательно влияют на падающее и проникающее в них лазерное излучение. При этом одной из характеристик, которые определяют степень прямого или обратного распространения излучения в биологической среде, является объемное рассеяние. В свою очередь основным источником рассеяния света в биологических тканях (БТ) является различие в значениях показателей преломления их компонент, т. е. между митохондриями, ядром, другими компонентами и цитоплазмой клеток; или же внутритканевой жидко-

стью и структурными элементами соединительной (фиброзной) ткани (коллагеновыми и эластиновыми волокнами) [1]. Следует отметить, что данные структурные элементы (их размеры, количество, а иногда и присутствие) определяют степень нормального или патологического функционирования органа, в состав ткани которого они входят. Потому очевидным является тот факт, что изменения в этих структурных элементах повлекут изменения в характере рассеяния света, которое для точности диагностики необходимо зарегистрировать с минимальными потерями и обработать.

С позиций обработки и количественной оценки наиболее применимыми считаются оптические свойства БТ, такие как коэффициенты рассеяния и поглощения, фактор анизотропии рассеяния, а также показатель преломления. Их получение возможно путем решения обратной задачи теории переноса излучения (ТПИ), например, в рамках прямого и инверсного методов Монте Карло (МК). Метод МК используется при решении основного уравнения ТПИ практически с любой необходимой точностью, при условии, что обеспечена необходимая вычислительная способность. Метод МК считается «золотым стандартом» среди методов биофотоники, так как именно он применяется в качестве сравнительного эталона для менее вычислительно-затратных технологий (диффузионное приближение, потоковые модели, метод добавления-удвоения и др.). Функциональные и точностные преимущества метода Монте-Карло определили его широкое применение в оптике БТ для решения как прямых, так и обратных задач [2].

Повышение удельного количества зарегистрированного света, рассеянного в прямом и обратном направлении в образце БТ успешно решено при использовании фотометрических средств с зеркальными эллипсоидами вращения в качестве приемно-интегрирующей системы [3, 4]. При этом технология изготовления таких средств тоже достаточно хорошо апробирована, а контроль формы поверхности, и, как следствие, качества функционирования эллипсоидальных рефлекторов разработан [5, 6].

В данной работе произведен численный эксперимент по распространению оптического коллимированного излучения в системе «эллипсоидальный рефлектор + биологическая ткань» в случае нормы и патологических изменений последней. Модель предусматривала изменение толщины исследуемой ткани в интервале, минимальное значение которого соответствует 1-2 актам рассеивания, а максимальное – определяет анатомическую возможность получения реального образца.

При симуляции МК была выбрана ткань яичника в здоровом и патологическом состоянии, оптические свойства которой определены для длины волны лазерного излучения 457 нм: коэффициент рассеивания и поглощения в раковом состоянии равен  $276 \text{ см}^{-1}$  и  $6.3 \text{ см}^{-1}$  соответственно, фактор анизотропии рассеяния  $g = 0,82$ . В случае со здоровой тканью коэффициент рассеивания и поглощения составлял  $172 \text{ см}^{-1}$  и  $6,6 \text{ см}^{-1}$  соответственно, а фактор анизотропии рассеяния  $0,83$  [7, 8]. Показатель преломления в обоих случаях усреднялся и был равен 1,4.

В результате были получены типичные [3] фотометрические изображения в прошедшем и

отраженном свете, обработка которых была произведена по аналогии с [4].

На рис. 1 и рис. 2 представлены графики зависимости освещенности внешнего и среднего колец фотометрических изображений от толщины образца в отраженном (рис. 1) и прошедшем (рис. 2) свете. Следует заметить, что приведенные результаты являются характеристичными и получены при симуляции МК движения 20 млн фотонов в фотометрической системе по результатам одного запуска. Как отмечалось в [3, 4], достаточным для адекватности результатов является запуск симуляции не менее чем 10 раз, что повлечет сглаживание и однозначность кривых с одновременным увеличением времени расчета. Этот процесс будет произведен и представлен в последующих работах авторов.

Анализ полученных данных позволяет заметить существенное отличие в освещенности, создаваемой на фотоприёмной площадке ПЗС приемника как в отраженном, так и в прошедшем свете, для ткани в норме и с патологическими изменениями. Особенно четко это проявляется при толщинах образцов  $0,005\text{--}0,05 \text{ см}$ .

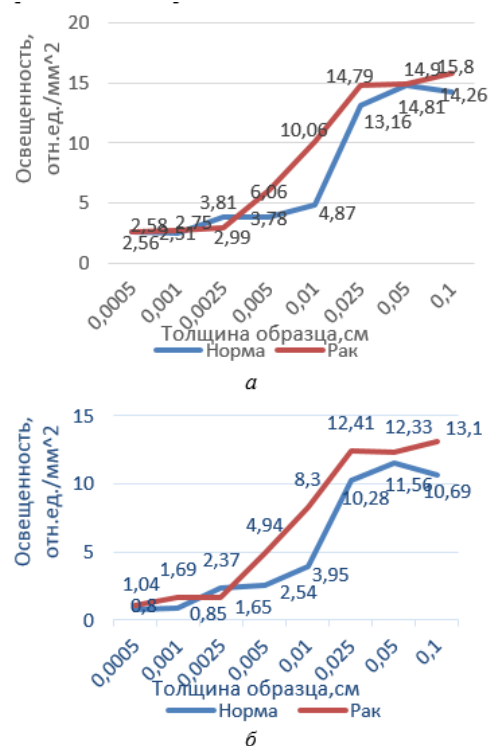


Рисунок 1 – Освещенность внешнего (а) и среднего (б) колец для нормальной и патологически измененной ткани яичника в отраженном свете

Таким образом, оптическая идентификация состояния тканей и сред организма человека с использованием фотометров с эллипсоидальными рефлекторами вполне может считаться диагностически ценной.



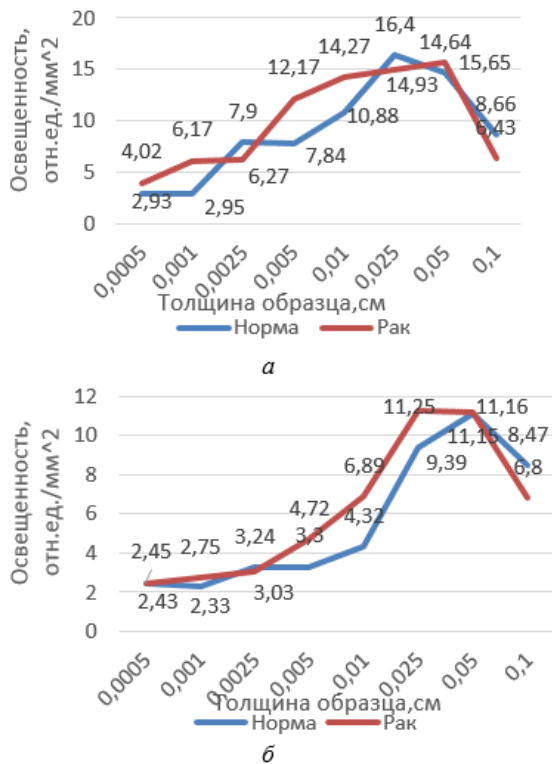


Рисунок 2 – Освещенность внешнего (а) и среднего (б) колец для нормальной и патологически измененной ткани яичника в прошедшем свете

Данная работа описывает процесс моделирования и требует дальнейшей проработки с внедрением реальных образцов БТ в состояниях, что характеризуют норму и патологию. При этом и количество итераций, и шаг моделирования должны быть увеличены. Использование данного метода позволит с большей вероятностью и доступностью определить степень развития патологии и состояние пациента.

УДК 620-6

## УСТРОЙСТВО ОЦЕНКИ ОСТРОТЫ ОСТРИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИГЛ Киселев М.Г., Мониц С.Г., Березняк В.Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**Иглы хирургические востребованы во всех областях хирургии.** Они предназначены для сшивания тканей при хирургических операциях.

Хирургическая игла является обязательным инструментом при наложении швов. Для выполнения высокоточных действий по проведению нитей через ткани к хирургическим иглам предъявляются следующие требования [1-3]:

- максимальная прочность при минимальной толщине;
- противодействие деформации;
- длительное сохранение механических свойств без развития «усталости» металла;
- отсутствие тенденции к излому;

## Литература

1. Симоненко В.В. Оптические свойства биологических тканей / В.В. Симоненко, Г.В. Тучин, 2007. – 48 с.
2. Сетейкин А.Ю. Применение метода Монте-Карло для задач биофотоники: Изд-во АМГУ / Сетейкин А.Ю., 2014. – 68 с.
3. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, I.V. Helich, «Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media», Appl Opt., no. 56 (30), pp. 8520–8526, 2017.
4. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk, «Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors», Devices and Methods of Measurements. 9(1):56-65, 2018.
5. Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Синявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2016. – № 2 (52). – С. 76–81. [На українском].
6. Безуглий М.О. Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів / М.О. Безуглий, Лінючева О.В., Безугла Н.В., Бик М.В., Костюк С.А // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017, № 1 (53). – С. 62–69. [На українском].
7. Alterations of the extracellular matrix in ovarian cancer studied by Second Harmonic Generation imaging microscopy / O.Nadiarnykh, R.B. LaComb, M.A. Brewer, P.J. Campagnola // BMC Cancer. – 2010.
8. LaComb R.B. Quantitative Second Harmonic Generation Imaging of the Diseased State Osteogenesis Imperfecta: Experiment and Simulation / R.B. LaComb, O. Nadiarnykh, P.J. Campagnola // Biophysical Journal. – 2008. – V. 94. – Pp. 4504–4514.

- стабильность положения в иглодержателе;
- исключение разрушения шовного материала (перетирания нити, ее расслоения, разрыва);
- незначительное повреждение тканей при проведении иглы;
- устойчивость к коррозии;
- простота стерилизации;
- технологичность изготовления при низкой себестоимости [4].

Их классифицируют на иглы хирургические, которые применяют для сшивания с помощью иглодержателя, и иглы лигатурные (рисунок 1).

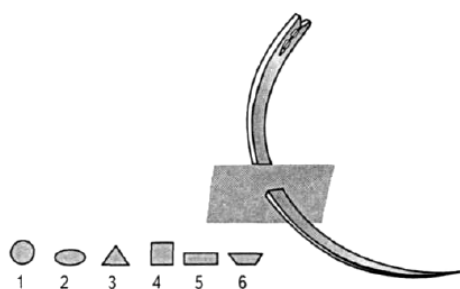
В зависимости от формы поперечного сечения хирургические иглы бывают круглыми

(овальными), трехгранными, квадратными, прямоугольными, трапециевидными (рисунок 2).



- а – изогнутая на  $1/4$  окружности;
- б – изогнутая на  $3/8$  окружности;
- в – изогнутая на  $1/2$  окружности;
- г – изогнутая на  $5/8$  окружности

Рисунок 1 – Классификация хирургических игл



- 1 – круглое, 2 – овальное, 3 – трехгранное,
- 4 – квадратное, 5 – прямоугольное,
- 6 – трапециевидное

Рисунок 2 – Особенности формы поперечного сечения тела иглы

Все иглы многоразового использования производятся из стали высочайшего качества, отличающиеся прочностью, высокой надежностью.

Иглы должны быть упругими при захвате их иглодержателем, а колющие части острия – острыми, без заусенцев и деформаций; должны быть устойчивы к циклу санитарной обработки, состоящему из дезинфекции, предстерилизационной очистки и стерилизации; должны иметь коррозионную устойчивость; вероятность безотказной работы игл должна быть не менее 0,9 в течение наработки, равной 400 проколам и 20 циклам санитарной обработки.

Соответствие игл требованиям п.2.8 (ГОСТ 25981-83) оценку обработки остроты острия хирургических игл следует проверять 30-кратным прокалыванием натянутой замши по ГОСТ 3117-78\* толщиной 0,4-0,7 мм, при этом колющая часть острия иглы не должна деформироваться. Деформацию колющей части острия иглы проверяют лупой ГОСТ 25981-83. Наличие заусенцев на колющей части острия иглы проверяют прокалыванием ваты. На колющей части острия иглы не должны оставаться волокна ваты.

Из ГОСТ 25981-83 «Иглы хирургические. Общие технические условия» видно, что для от-

работки методик определения механических характеристик хирургических медицинских игл была проведена серия испытаний. Однако визуальный осмотр колющей части острия иглы, проверка невооруженным глазом радиуса кривизны изогнутых игл не дает точной количественной оценки для сравнения. В связи с этим возникла необходимость в создании устройства для количественной оценки остроты острия хирургических дугообразных игл.

Предлагаемое устройство для оценки остроты острия хирургических игл (рисунок 3) работает следующим образом.

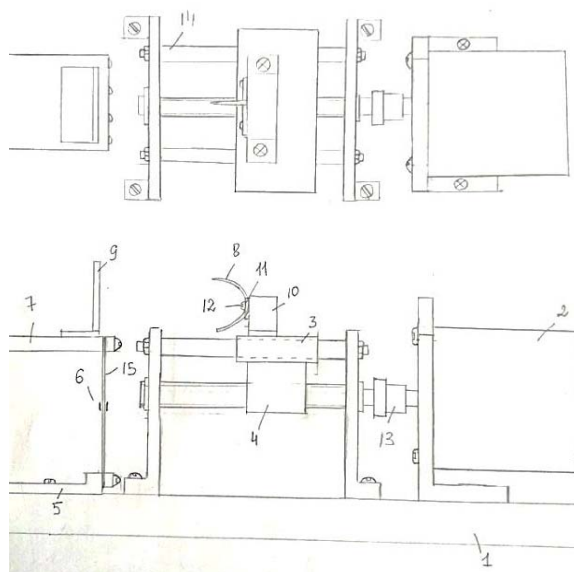


Рисунок 3 – Устройство для оценки остроты острия хирургических игл

На основании 1 смонтированы цилиндрические направляющие 14, по которым от электродвигателя 2 посредством передачи «винт-гайка» 4 в горизонтальном направлении перемещается каретка 3. На ее поверхности неподвижно закреплена планка 10, к которой, посредством винтов 12, крепится пластина 11, к которой при помощи, в свою очередь, крепится испытуемая игла 8.

Для измерения усилия прокалывания устройство снабжено упругими плоскопараллелограммными направляющими. Они состоят из неподвижного кронштейна 5, который закреплен на основании устройства. С двух сторон к кронштейну прикреплены стальные упругие пластины 15, которые в верхней части соединены между собой пластиной 7. На одну из стальных упругих пластин с двух ее противоположных сторон симметрично относительно друг друга наклеены фольговые тензометрические датчики 6, включенные в полумостовую схему и реагирующие на применение деформации пластины. Сигнал от них поступает на усилитель далее на осциллограф.

На подвижной пластине 7 с помощью пластилина закрепляется планка 9 с отверстием, на которую предварительно натягивается и с помощью прозрачного скотча закрепляется полиэтиленовая пленка. Работа устройства осуществляется следующим образом. При включении электродвигателя каретка вместе с испытуемой иглой перемещается в направлении рамки с пленкой со скоростью  $v$ . В момент ее прокалывания испытуемой иглой происходит деформация упругих пластин, что фиксируется тензометрическими датчиками и регистрируется на экране осциллографа.

В дальнейшем необходимо проведение комплекса исследований различных типов хирургических игл с использованием различных материалов. Это позволит разработать дополнительные технические требования к хирургическим дугообразным иглам, усовершенствовать существующие отраслевые и государственные стандарты изготовления.

В конечном итоге это позволит для оценки остроты хирургических игл использовать количественные показатели, в частности, максимальное значение усилия прокалывания пленки из определенного материала.

## Литература

1. Бурых М.П. Операционная техника. Тесты, ответы, комментарии. – Харьков, 1995. – 132 с.
2. Бурых М.П. Основы технологии хирургических операций. – Харьков : РА и ООО «Знание», 1998. – 480 с.
3. Буянов В.М., Егиев В.И., Удотов О.А. Хирургический шов. – М. : ТОО «Рapid-Print», 1993. – 104 с.
4. Григорьев Е.Е. Приемы и способы, позволяющие надежно и быстро завязывать узлы при проведении хирургических операций (советы молодым хирургам). – СПб : Изд-во Буковского, 1996. – 143 с.
5. Золтан Я. *Cicatrix optima*. Операционная техника и условия оптимального заживления раны. – Будапешт : Изд-во АН Венгрии, 1983. – 175 с.
6. Слепцов И.В., Черников Р.А. Узлы в хирургии. – СПб : Салитмедкнига, 2000. – 176 с.
7. Федоров И.В., Сигал Е.И., Одинцов В.В. Эндоскопическая хирургия. – М. : ГЭОТАР «Медицина», 1998. – 350 с.

УДК 528.8; 629.78

## СОЗДАНИЕ МАЛОМАССОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

Беляев Б.И., Казак А.А., Кучинский П.В., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

Проблема изменения климата, в котором важную роль играет атмосфера, ее оптически активные компоненты, приводит к необходимости организации мониторинга характеристик газового состава атмосферы и, в частности, глобальные непрерывные наблюдения за содержанием «парниковых» и «озоноразрушающих» малых газовых составляющих (МГС).

В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ в рамках выполнения задания НТП Союзного государства «Технология-СГ» разрабатывается и изготавливается экспериментальный образец (ЭО) комплекта маломассогабаритных оптических датчиков (МОД) с различными оптическими диапазонами, на базе которых создается трехдиапазонный маломассогабаритный спектро радиометр (МСП) научной аппаратуры наноспутников для исследования МГС тропосферы Земли.

МОД предназначены для решения следующих фундаментальных задач, относящихся к физике и химии атмосферы:

– установление механизмов и скорости восстановления озона в атмосфере и получение ответа на актуальный вопрос: происходит ли восстановление содержания озона в атмосфере (ликвидация озоновых дыр), в соответствии

с существующими представлениями в данной области исследований;

– установление и уточнение источников аэрозолей и газовых примесей, которые влияют на качество приземного воздуха;

– выяснение и уточнение роли озона и аэрозолей в изменении климата;

– определение основных путей переноса аэрозолей и малых газовых примесей в атмосфере;

– выяснение степени количественных изменения потоков УФ радиации, достигающей поверхности планеты.

МОД с различными оптическими диапазонами будут определять количественное содержание МГС на основе измерений спектров рассеянного солнечного излучения методом спектроскопии дифференциального поглощения со спутников в спектральных диапазонах, содержащих полосы поглощения исследуемых газов.

Маломассогабаритный спектро радиометр МСП-08 предназначен в первую очередь для надирных наблюдений, но также позволяет реализовать и лимбовый метод измерения (рис. 1).

В случае надирной схемы в МОД поступает солнечное излучение отраженное земной поверхностью и дважды прошедшее сквозь слой

атмосферы, т. е. уходящее излучение атмосферы измеряется в вертикальном направлении или под различными углами к вертикали (вертикальное разрешение составляет 5-10 км и хуже, а горизонтальное может достигать ~ 2–3 км).

При лимбовых измерениях линия наблюдения направлена на горизонт Земли (вертикальное разрешение 1–4 км, горизонтальное – 200–300 км и более).

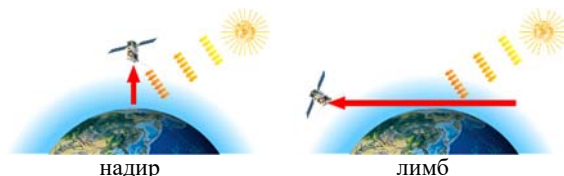


Рисунок 1 – Методика измерений

Поле зрения каждого элемента изображения и ширина полосы для каждого наблюдения определяется приемником излучения МОД спектро-радиометра и высотой орбиты спутника. Развертка по второй пространственной координате обеспечивается движением аппарата по орбите. Поскольку никаких мер по коррекции смаза изображения не будет предприниматься, то время накопления на детекторах прибора будет ограничено только горизонтальной скоростью космического аппарата.

Все МОД в составе МСР-08 имеют одинаковую логическую структуру и представляют собой моноблок, в который входит проекционный объектив; стандартный узел полихроматора: узел входной щели, дифракционная решетка с узлом юстировки или без, плоское поворотное зеркало; приемник излучения, размещенный на электронной плате контроллера МОД и представляющий собой приемную линейку с числом элементов 3648, что позволяет получать спектр высокого разрешения в диапазоне  $0,3 \div 0,5$  мкм. За счет движения спутника по орбите МОД позволит получать изображение эмиссий лимба Земли.

Электронная часть – одноплатный компьютер – расположена на тепловой панели, которая поддерживает необходимую рабочую температуру, контроль за которой осуществляется с помощью датчиков температуры.

В ходе реализации задания были промоделированы и оптимизированы оптические схемы полихроматоров МОД в программе для оптического моделирования ZEMAX для различных спектральных диапазонов с целью достижения максимального спектрального разрешения в соответствующих спектральных каналах. В результате сделаны следующие выводы: спектральные диапазоны МОД обеспечиваются применением различных вогнутых сферических голографических дифракционных решеток с расчетной плотность штрихов на мм, а также регулировкой ширины входных щелей полихроматоров; уменьше-

ние габаритов достигается вводом в оптическую схему поворотного плоского зеркала; требуемое спектральное разрешение достигается применением компактных многоэлементных неохлаждаемых приемников излучения линейного или матричного типа с высокой чувствительностью в УФ области.

Были изготовлены макеты оптических схем полихроматоров МОД и проведены их лабораторные испытания на метрологическом комплексе для спектрально-энергетических калибровок систем оптического дистанционного зондирования «Камя».

В результате испытаний была определена зависимость аппаратной функции от ширины входной щели полихроматора МОД и проведена калибровка МОД по абсолютным значениям спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) при различных ширинах входных щелей, времени экспозиции сигнала и различной СПЭЯ диффузного излучателя комплекса «Камя».

При испытаниях была выявлена зависимость выходного сигнала МОД от температуры, и на основании исследований определен калибровочный коэффициент температурной зависимости СПЭЯ.

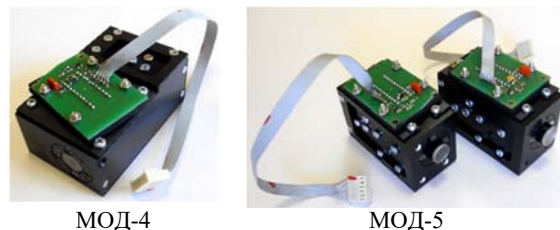


Рисунок 2 – Внешний вид ЭО МОД



Рисунок 3 – Внешний вид ЭО МСР-08 с закрытыми и раскрытыми панелями солнечных батарей

К настоящему времени разработаны экспериментальные образцы трех маломассогабаритных оптических датчиков (рис. 2): двух МОД-5 на спектральные диапазоны 300-500 и 470-500 нм и одного МОД-4 на диапазон 300-450 нм. Датчики МОД-5 имеют одинаковый конструктив и отличаются только дифракционными решетками и узлом входной щели, МОД-4 выполнен в другом конструктиве.

В конструктивном варианте компоновки ЭО маломассогабаритного спектро-радиометра МРС-8

(рис. 3) полихроматоры и контроллеры трех маломассогабаритных оптических датчиков (МОД-4 и двух МОД-5) размещены в алюминиевом корпусе формата 1U CubeSat размером  $10 \times 10 \times 10$  см. При этом для реализации методики измерений в надирной и касательной геометрии два объектива полихроматоров МОД на спектральный диапазон 300 - 500 и 470 - 500 нм направлены в надир, а третий объектив полихроматора на спектральный диапазон 300 - 450 нм направлен с помощью углового фокона под  $30^\circ$

вниз относительно вектора скорости полета и в плоскости орбиты спутника.

Маломассогабаритные оптические датчики для регистрации спектров высокого разрешения и изображений с орбит высотой 510-550 км позволят получить новые знания об изменении климата Земли на основе проведения регулярных измерений содержания  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  и др. малых газовых составляющих тропосферы Земли с образовательных и исследовательских микро- и наноспутников.

УДК 53.082.5:621.373.826

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРОФИЛОМЕТРА С НАКЛОННЫМ ПАДЕНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Рыжевич А.А.<sup>1,2</sup>, Балыкин И.В.<sup>1,2</sup>, Машенко А.Г.<sup>1</sup>, Смирнов А.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В задачах бесконтактной оптической профилометрии различных поверхностей в качестве рабочего инструмента зачастую используются лазерные световые пучки. В работе [1] рассмотрена оригинальная конструкция профилометра, использующего сфокусированный цилиндрической линзой лазерный пучок, направленный не по нормали к приближенно плоской поверхности объекта, для исследования профиля этой поверхности. Суть предложенного в [1] профилометрического метода состоит в определении величины смещения  $\Delta L$  участка поверхности объекта от прямолинейной образующей по величине поперечного смещения  $\Delta l$  светового пятна в виде полосы с помощью CCD-камеры, оснащенной микроскопом. Для измерения величины смещения полосы был использован алгоритм, основанный на построении аппроксимации усредненного поперечного профиля интенсивности излучения одномерной функцией Гаусса. Однако в силу того, что в используемой схеме излучение падает на поверхность под углом, профиль интенсивности световой полосы на исследуемой поверхности в общем случае отличается от симметричного гауссова, и максимум найденной аппроксимирующей симметричной функции Гаусса, по которому определяется положение полосы, не совпадает с истинным максимумом профиля интенсивности, из-за чего точность измерений уменьшается.

Настоящая работа посвящена усовершенствованию программы для указанного профилометрического устройства путем нахождения аппроксимирующей функции, более точно описывающей профиль интенсивности световой полосы на поверхности исследуемого объекта.

Интенсивность рассеянного излучения в рассмотренной схеме пропорциональна интенсивности падающего, поэтому для построения аппрок-

симирующей функции необходимо получить выражение для поперечного профиля интенсивности пучка в месте «соприкосновения» с поверхностью.

Интенсивность в перетяжке гауссова пучка [1] задается выражением:

$$I(\rho, z) = I_0(z) \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиальная координата,  $z$  – продольная координата ( $z=0$  соответствует фокальной плоскости линзы),  $w$  – половинная ширина пучка по уровню  $1/e^2$  (рис. 2 [3]). При этом:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad \text{или} \quad (2)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2},$$

где  $w_0$  – половинная ширина пучка по уровню  $1/e$  в перетяжке,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $b = \pi w_0^2 / \lambda$  – рэлеевская длина.

Для определения явного вида  $I_0(z)$  необходимо учесть закон сохранения энергии, который для «одномерного» пучка сфокусированного цилиндрической линзой можно записать в форме:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I(z, \rho) d\rho = \text{const} = P \quad (3)$$

Отсюда следует, что:

$$I_0(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w(z)} \quad (4)$$

Для определения параметра  $P$  использовано условие нормировки вида:

$$I(0, -f) = 1 \quad (5)$$

Суть его состоит в том, что интенсивность на оси пучка в плоскости линзы равна 1 относительной единице. Тогда:

$$I(0,-f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{w(-f)} = 1 \quad (6)$$

Откуда:

$$P = \sqrt{\frac{\pi}{2}} w(-f) \quad (7)$$

Значит,

$$I_0(z) = \frac{w(-f)}{w(z)} \quad (8)$$

$$I(\rho, z) = \frac{w(-f)}{w(z)} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right) \quad (9)$$

Ширина пучка в перетяжке при фокусировке собирающей линзой определяется выражением:

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi w_i}, \quad (10)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $w_i$  – полуширина исходного пучка, падающего на линзу.

Для построения функции распределения интенсивности вдоль наклонной прямой, располагающейся в плоскости, содержащей ось пучка, вводится ось  $x$  (см. рис. 1).

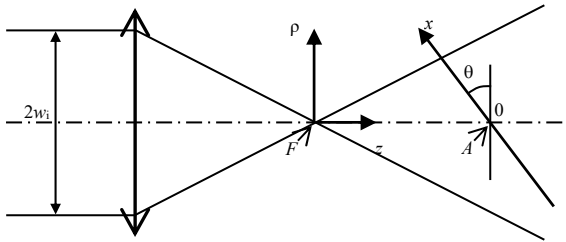


Рисунок 1 – Сечение гауссова пучка плоскостью падения

Расстояние от фокуса линзы до пересечения оси  $x$  с осью пучка (точка А) обозначено как  $z_A$ . Начало координат системы  $\rho Fz$  находится в точке фокуса линзы. Таким образом, координаты точки, лежащей на оси  $x$ , с использованием естественной параметризации записываются в виде:

$$\begin{cases} \rho = x \cos \theta \\ z = z_A - x \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

Подставляя (2) и (11) в (9) с учетом (10), получим:

$$I(x) = \exp\left(-\frac{2\pi^2 w_i^2 x^2 \cos^2 \theta}{f^2 \lambda^2 \left(1 + \frac{\pi^2 w_i^4 (z_A - x \sin \theta)^2}{f^4 \lambda^2}\right)}\right) \times \frac{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 w_i^4}{f^2 \lambda^2}}}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 w_i^4 (z_A - x \sin \theta)^2}{f^4 \lambda^2}}} \quad (12)$$

Вводя обозначение  $C^2 = \frac{\pi^2 w_i^4}{f^4 \lambda^2}$ , имеем:

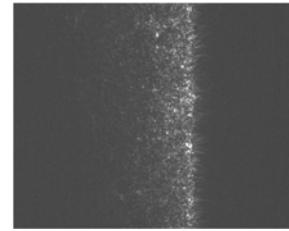
$$I(x) = \exp\left(-\frac{2C^2 f^2}{w_i^2} \frac{(x \cos \theta)^2}{1 + C^2 (z_A - x \sin \theta)^2}\right) \times \frac{\sqrt{1 + C^2 f^2}}{\sqrt{1 + C^2 (z_A - x \sin \theta)^2}} \quad (13)$$

Отсюда получаем выражение для модели аппроксимации:

$$I(x, z_A, A, B, C, D, \theta) = A \cdot \exp\left(-\frac{2C^2 f^2}{w_i^2} \frac{((x - B) \cos \theta)^2}{1 + C^2 (z_A - (x - B) \sin \theta)^2}\right) \times \frac{\sqrt{1 + C^2 f^2}}{\sqrt{1 + C^2 (z_A - (x - B) \sin \theta)^2}} + D \quad (14)$$

Количество свободных параметров в приведенной модели – 6. Для обеспечения устойчивости процедуры аппроксимации значения некоторых из этих параметров (например, угол  $\theta$ ) фиксируются на основании априорных сведений.

Пример применения формулы (14) для аппроксимации экспериментальных данных, полученных для экспериментального лазерного пучка с параметрами  $w_i = 5$  мм,  $f = 30$  мм,  $\lambda = 635$  нм, угол падения  $\theta = 45^\circ$  приведен на рис. 2.



а



б

Рисунок 2 – Исследование профиля светового пятна при наклонном падении одномерного гауссова пучка: световое пятно на поверхности в виде полосы, полученное экспериментально (а), аппроксимация усредненного распределения интенсивности гауссианом и функцией (14) (б)

На рисунке 2(а) показано изображение светового пятна в виде полосы, наблюдаемое в микроскоп. В качестве исходных данных, по которым строится аппроксимирующая функция (рисунок 2(б)), используется усредненный по строкам профиль интенсивности изображения

на рисунке 6(а). Следует отметить, что аппроксимация, построенная на основании предложенной аппроксимирующей функции (14), отличается от аппроксимации функцией Гаусса в лучшую сторону, поскольку более точно описывает профиль экспериментального распределения интенсивности и положение максимума интенсивности, по которому определяется отклонение участка поверхности в месте падения пучка от прямолинейной образующей. Скорректированный коэффициент детерминации  $R^2$  для аппроксимирующей функции вида (14) составляет

величину 0.96241, в то время как для аппроксимирующего гауссиана  $R^2 = 0.79282$ .

#### Литература

Рыжевич, А.А. Оптические методы определения параметров плоских и цилиндрических поверхностей различного качества / А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич, В.Е. Лепарский, А.Г. Смирнов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 2, спецвыпуск № 2. – С. 34–66.

УДК 535.2:535.361:53.043

### ФОТОМЕТРИЯ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ СВЕТОРАССЕЙНИЯ КОЖЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОСВЕТЛЕНИИ

Самиляк А.Б., Безуглый М.А.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Интерес к использованию оптических методов для диагностики и лечения различных заболеваний постоянно растет в связи с их относительной простотой, достаточно низкой себестоимостью и безопасностью для пациента [1, 2]. Различные физические модели светорассеяния лежат в основе создания и развития диагностических средств лазерной медицины. Однако анализ и интерпретация рассеянного луча может быть некорректной и недостоверной вследствие проникновения через поверхностные слои биологической ткани (БТ). Это объясняется тем, что пространственное разрешение и глубина зондирования в пределах терапевтического (диагностического) окна сильно ограничены рассеивающей способностью БТ. Последнее, в свою очередь, является следствием отличия показателей преломления структурных компонентов БТ и внутритканевой жидкости или внутриклеточных органелл и клеточной цитоплазмы. Тогда очевидно, что «сглаживание» значений показателей преломления может существенно упростить транспорт лазерного излучения в БТ [3]. Одним из наиболее успешных решений является, так называемое, оптическое просветление [3, 4], когда БТ насыщается биохимическим раствором с целью усреднения коэффициентов преломления между слоями этой биологической ткани. Данная методика широко используется для диагностики и терапии кожных заболеваний и патологий, а также существенно облегчает проведение фотодинамической терапии и других типов светового воздействия [3, 4].

В тоже время контроль процесса просветления, с учетом типологии применяемых технических средств, хоть и показывает однозначные результаты, но может быть существенно улучшен и оптимизирован. Для этого в данной работе, с учетом

полученных теоретических и экспериментальных данных по взаимосвязи оптических свойств БТ с относительным пространственным распределением рассеянного света [5-8], было предложено использовать метод зеркальных эллипсоидов вращения.

В данной работе была произведена серия модельных экспериментов для получения фотометрических изображений при биометрии эллипсоидальными рефлекторами для кожи человека с различных участков тела (ладони, живот, грудь, бедро, спина, плечо). Единство оптических свойств для всех участков кожи сопровождалось изменением толщины слоев (роговой слой, эпидермис, дерма, жировой слой), которые задавались при моделировании. При этом «неинвазивность» симуляции Монте Карло распространения света в фотометрической системе была достигнута путем добавления условно полу-бесконечного мышечного слоя.

На основании результатов [3, 4, 9] было предположено практическое постоянство показателя преломления для всех слоев кожи, кроме рогового, для которого динамика изменения в зависимости от времени просветления изменялась согласно графика, показанного на рис. 1.

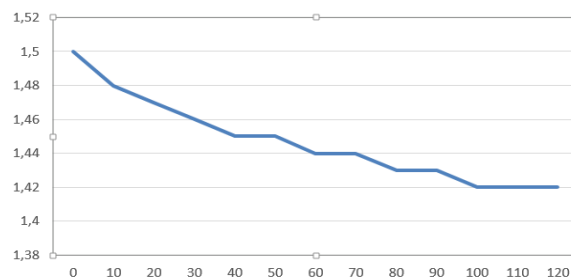


Рисунок 1 – Динамика изменения показателя преломления рогового слоя в зависимости от времени просветления

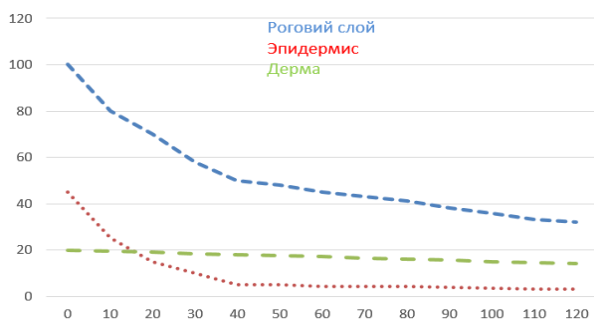


Рисунок 2 – Динамика изменения коэффициента рассеяния (см<sup>-1</sup>) для рогового слоя, эпидермиса и дермы от времени просветления (мин)

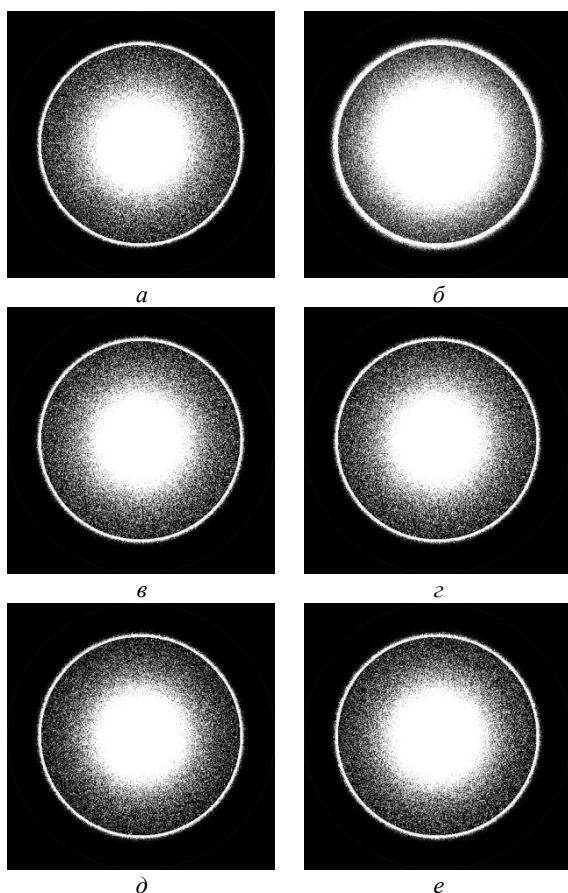


Рисунок 3 – Фотометрические изображения при эллипсоидальной фотометрии для кожи человека в области живота при моделировании для отраженного (а), (б), (в), (г) и прошедшего (д), (е) света соответственно

Показатель преломления и коэффициент поглощения слоев кожи считались постоянными и принимались: для эпидермиса  $n = 1.36$  и  $\mu_a = 0.15 \text{ см}^{-1}$ , для дермы  $1.39$  и  $0.073 \text{ см}^{-1}$ , для жировой ткани  $1.44$  и  $0.68 \text{ см}^{-1}$ , для мышечного слоя  $1.37$  и  $2 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Фактор анизотропии рассеяния для рогового слоя, эпидермиса и жировой ткани составлял  $g = 0.8$ , для дермы –  $0,76$ , а для мышечной ткани –  $0,9$ . Коэффициент рассеяния для жировой и мышечной ткани не менялся на протяжении всего вре-

мени воздействия просветляющего реагента и становил  $15 \text{ см}^{-1}$  и  $215 \text{ см}^{-1}$  соответственно. А для рогового слоя, эпидермиса и дермы, с учетом экспериментальных и модельных данных [3, 4, 9], он изменялся в соответствии с рис. 2.

В результате симуляции Монте Карло распространения света в системе «эллипсоидальный рефлектор + биологическая ткань» были получены фотометрические изображения, пример которых показан на рис. 3.

Изображения (а) и (б) на рис.3 соответствуют модели с полу-бесконечным мышечным слоем, что позволяет производить отражательную (диффузно рассеивающую назад) биометрию эллипсоидальными рефлекторами.

Изучение массива полученных фотометрических изображений, что характеризуют зависимость светорассеяния от времени просветления, целесообразно производить как минимум с позиций зонного анализа при эллипсоидальной фотометрии [5], что и является целью последующих исследований авторов.

### Литература

1. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике. Монография – М.: Физматлит, 2013. – 812 с.
2. Тучина Д.К. Оптика и спектроскопия в биофизике и медицине / Д.К. Тучина, В.Д. Генин, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, В.В. Тучин // Оптика и спектроскопия, 2016. – Том 120. – № 1. – С. 3–5.
3. Тучина Д.К. Оптическое просветление тканей кожи *ex vivo* под действием полиэтиленгликоля / Д.К. Тучина, В.Д. Генин, А.Н. Башкатов, Э.А.Генина, В.В.Тучин // Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, 2016. – № 1. – С. 36–45.
4. Генина Э.А. Оптическое просветление кожи под действием глицерина: исследования *ex vivo* и *in vivo* / Э.А. Генина, А.Н. Башкатов, Ю.П.Синичкин, В.В. Тучин // Оптика и спектроскопия, 2010. – Том 109, № 2. – С. 256–263.
5. Безуглый, М.А. Обработка изображений при эллипсоидальной фотометрии / М.А. Безуглый, Н.В. Безуглая, А.Б. Самиляк // Приборы и методы измерений: научно-технический журнал, 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 67–76.
6. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, I.V. Helich, «Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media», *Appl Opt.*, no. 56 (30), pp. 8520–8526, 2017.
7. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk, «Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors», *Devices and Methods of Measurements*. 9(1):56-65, 2018.
8. Bezuglyi, M., N. Bezuglaya, and A. Viruchenko. «On the possibility of ellipsoidal photometry and



Monte Carlo simulation to spatial analysis of biological media». Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2017 IEEE 37th International Conference on. IEEE, 2017.

9. И.В. Меглинский, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, Д.Ю. Чурмаков, В. В. Тучин, «Исследования

возможности увеличения глубины зондирования методом отражательной конфокальной микроскопии при иммерсионном просветлении приповерхностных слоев кожи человека», Квантовая электроника, 32:10 (2002), С. 875–882.

УДК 681.2.082

## УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ОСТРОТЫ ОСТРИЯ ИНЪЕКЦИОННЫХ ИГЛ

Киселёв М.Г., Монич С.Г., Семенкович В.П., Кучинская О.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Иглы одноразовые медицинские стерильные – предназначены для проведения внутримышечных, внутрикожных и подкожных инъекций, с помощью системы для вливаний или шприцев, а также для взятия крови [1]. Игла (рисунок 1) представляет собой металлическую трубку 1 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т различного диаметра  $D$  и длины  $L$ .

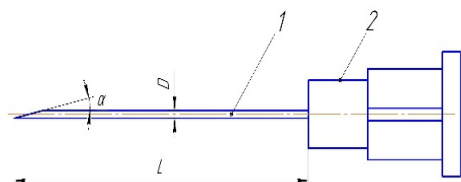


Рисунок 1 – Основные элементы и геометрические параметры инъекционной иглы

Один конец трубки, предназначенный для проникновения в ткани, остро заточен и называется острием иглы. Другой называется головкой иглы 2 (канюлей). Острие иглы характеризуется углом заточки  $\alpha$ .

Основные размеры стерильных инъекционных игл одноразового применения, технические требования к ним, правила приемки и методы испытаний установлены Межгосударственным стандартом ГОСТ 25046-2005.

Указанный выше стандарт предусматривает проверку остроты острия иглы, которая выполняется следующим способом.

Игла, закрепляемая в приспособлении, совершает поступательное движение с постоянной скоростью ( $40 \pm 10$ ) мм/мин и прокалывает пленку полиэтилена высокого давления по ГОСТ 10354 толщиной ( $150 \pm 15$ ) мкм, закрепленную в рамке [2]. Значения максимальной силы прокалывания, не должно превышать допустимые величины, приведенные в ГОСТ 25046-2005.

При этом отклонения испытательной нагрузки не должны превышать  $\pm 5\%$  номинальных значений нагрузки.

Однако сегодня в литературе отсутствуют сведения о современных устройствах, применяемых для проверки остроты острия инъекционных игл.

В связи с этим, цель данной работы заключается в создании устройства проверки остроты острия инъекционных игл.

Принципиальная схема созданного устройства представлена на рисунке 2.

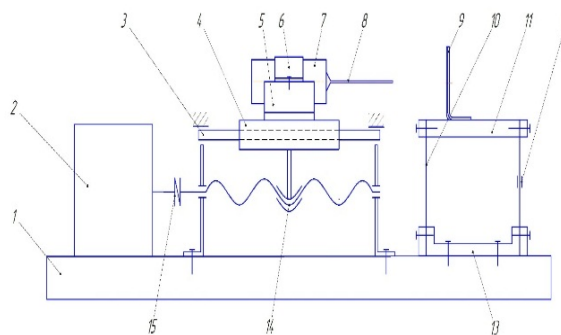


Рисунок 2 – Принципиальная схема устройства проверки острия инъекционных игл

На массивном основании 1 смонтированы цилиндрические направляющие 3, по которым от электродвигателя 2 (РД-09) посредством муфты 15 и передачи «винт-гайка» 14 в горизонтальном направлении перемещается каретка 4 со скоростью 42 мм/мин. На ее поверхности закреплена призма 5, в паз которой устанавливается шприц 7 и неподвижно с помощью хомута 6 закрепляется на ней. На подыгольный конус шприца устанавливается испытуемая игла 8.

Для регистрации и измерения усилия в процессе прокалывания полиэтиленовой пленки испытуемой инъекционной иглой в устройстве применены упругие плоскопараллельные направляющие. Они состоят из кронштейна 13, который прикреплен к основанию устройства. С двух сторон к кронштейну прикреплены стальные (У8А) упругие пластины 10, которые в верхней части соединены между собой пластиной 11. На ней с помощью пластины закреплены металлическая рамка 9, с отверстием диаметром 15 мм, на которой с помощью клея закрепляются полиэтиленовая пленка.

При включении электродвигателя и перемещении каретки по направлению к рамке происходит прокалывание полиэтиленовой пленки

испытуемой инъекционной иглой. На одну из стальных упругих пластин с двух ее противоположных сторон симметрично относительно друг друга наклеены фольговые тензотрические датчики 12 с сопротивлением 100 Ом, включенные полумостовую схему. Усилие, возникающее при прокалывании пленки, вызывает упругую деформацию пластин с наклеенными на ней тензодатчиками, сигнал с которых поступает на усилитель и далее на цифровой запоминающий осциллограф ALEX2102СЕХ.

Для тарировки измерительной системы, т. е. установления количественной зависимости между показаниями осциллографа и величиной усилия прокалывания, устройство оснащено специальным приспособлением.

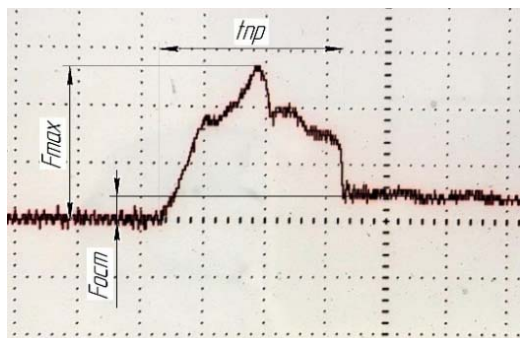


Рисунок 3 – Осциллограмма, полученная в ходе проведения экспериментов

Испытанию подвергались одноразовые инъекционные иглы различного диаметра  $D = 0,6-0,9$  мм в состоянии поставки. На рисунке 3 показана осциллограмма измерения усилия, действующей на иглу за время прокалывания ею полиэтиленовой пленки, где  $F_{max}$  – максимальное значение силы, при которой происходит разрыв полиэтиленовой пленки острием иглы (нормируемое показание),  $F_{остп}$  – сила обусловленная трением тела иглы о поверхность пленки,  $t_{пр}$  – время прокола, т. е. время с момента когда острие иглы касается, разрывает полиэтилен и прохождение кривой кромки через отверстие до момента полного разрыва пленки до диаметра испытуемой иглы и появления  $F_{остп}$ .

Результаты испытаний четырех инъекционных игл различного диаметра представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Экспериментальные и нормируемые значения усилия прокалывания полиэтиленовой пленки инъекционными иглами различного диаметра

| Диаметр иглы, мм | Экспериментальное значение усилия прокалывания полиэтиленовой пленки инъекционной иглой, Н | Нормируемое значение усилия прокалывания, Н, не более |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0,6              | 0,48                                                                                       | 0,70                                                  |
| 0,7              | 0,55                                                                                       | 0,80                                                  |
| 0,8              | 0,63                                                                                       | 0,90                                                  |
| 0,9              | 0,63                                                                                       | 1,0                                                   |

Приведённые в таблицы 1 экспериментальное значение усилия прокалывания представляют собой среднеарифметическое результатов пяти испытаний одной иглой. Из сопоставления экспериментально полученных и нормируемых значений усилия прокалывания следует, что все испытываемые инъекционные иглы по остроте острия соответствуют требованиям указанного стандарта.

Выводы.

1. Создано оригинальное устройство, позволяющее осуществлять проверку остроты острия инъекционных игл в соответствии с требованиями международных стандартов ГОСТ 25046-2005.

2. Разработана методика проверки остроты острия инъекционных игл с использованием созданного устройства.

3. Результатами выполненных экспериментов по проверке остроты острия инъекционных игл различного диаметра в состоянии поставки подтверждена правомерность практического применения созданного устройства и разработанной методики для проведения соответствующих испытаний инъекционных игл.

4. Получаемые с помощью созданного устройства осциллограммы измерения усилия за время однократного акта прокалывания пленки инъекционной иглой обладают высокой информативностью и позволяют детально исследовать особенности протекания всех стадий изучаемого процесса.

#### Литература

- ГОСТ 25725-83. «Инструменты медицинские. Термины и определения».
- ГОСТ 25046. «Иглы инъекционные одноразового применения. Основные размеры. Технические требования. Методы испытаний».

УДК 624.94

### ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СВОТТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОЛОВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Сернов С.П., Балохонов Д.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Современные транспортные средства нуждаются в принципиально-новом светотехническом оборудовании на основе полупроводниковых источников света (светодиодов), так как скорость

движения и сложность дорожной обстановки все время возрастают, а водители вынуждены тратить все больше времени на принятие верных решений при управлении транспортным средством.

И если для светосигнального оборудования в настоящее время существует множество отработанных конструкций с применением светодиодов, то для головного освещения (фары дальнего и ближнего света, дневные ходовые огни, противотуманные фары и т. п.) не существует надежных конструкций с применением новых эффективных источников света, несмотря на появление светодиодов со световым потоком 1000 лм и более. Это связано с необходимостью формировать четкую светотеневую границу (чтобы не ослеплять встречных водителей), а также с существенной зависимостью светового потока полупроводниковых источников света от температуры.

Разнообразие серийных конструкций фар автомобилей с применением полупроводниковых источников света, производимых в Европе, Америке и Азии, можно свести к следующей классификации:

1. Конструкции, применяющие светодиод как прямую замену лампы накаливания (или галогенной). В этих конструкциях светотеневая граница создается проекционной системой из массивной асферической линзы и шторки, изображение которой и создает четкую границу света и тени. Так как световой поток светодиода используется не полностью из-за шторки, то светодиод обычно работает при повышенном токе инжекции, перегревается и имеет малый срок службы. Для снижения температуры могут применяться активные системы охлаждения, что снижает надежность конструкции.

2. Конструкции на основе лазерной проекции, где луч полупроводникового лазера падает на люминофор, производящий белый свет. Форма слоя люминофора может быть произвольной, что делает шторку ненужной и улучшает КПД фары. Полупроводниковые лазеры меньше зависят от температуры, и системы охлаждения можно сделать менее сложными. Недостатки данной конструкции связаны с выгоранием люминофора (что уменьшает срок службы фары), а также с риском повреждения люминофора и последующего лазерного поражения глаз участников дорожного движения. Кроме того, оптическая система лазерной фары может быть подвержена вибрации и ударам.

3. Конструкции на основе матричных многокристальных светодиодов с произвольно управляемыми кристаллами. В данных конструкциях светодиодные матрицы служат для генерации «изображения» заданного распределения силы света, которое затем проецируется на проезжую часть с помощью проекционной системы на основе линзы с поверхностями второго-четвертого порядка [1]. Такие конструкции позволяют в режиме реального времени создать практически любое распределение освещенности на проезжей части, включая уменьшение освещенности в направлении препят-

ствий и встречных автомобилей или пешеходов, а также дополнительного освещения обочин дороги при повороте рулевого колеса. Недостатком данной конструкции является малая надежность составной многокристальной светодиодной матрицы, которая может потерять работоспособность при выходе из строя нескольких светодиодов. Кроме того, матричная фара нуждается в дополнительном процессоре для управления исключительно матрицей светодиодов, что затрудняет ее применение на транспортных средствах с бортовым компьютером недостаточной мощности.

4. Конструкции, состоящие из поворачиваемых механически направленных источников света. Эти конструкции способны дополнительно концентрировать свет на обочине или отводить его от встречных объектов, однако механические детали ненадежны, и срок службы таких фар по сравнению с фарами со стационарным источником света меньше [2]. Кроме того, поворачивать необходимо не отдельный светодиод, а светодиод вместе со вторичной оптикой, что не позволяет создать одну деталь вторичной оптики на все светодиоды и добиться экономии массы и материала.

Таким образом, после анализа основных конструкций светодиодных фар, можно сформулировать следующие рекомендации принципы конструирования светотехнических изделий головного освещения транспортных средств с использованием светодиодов:

1. Для улучшения надежности и увеличения срока службы фары в качестве главного источника света необходимо использовать единичный мощный (со световым потоком не менее 1000 лм) светодиод.

2. Для снижения влияния температуры на изделие ток инжекции этого светодиода должен выбираться так, чтобы при любой температуре из диапазона рабочих температур изделия световой поток не уменьшался ниже необходимой величины.

3. Для экономии светового потока светодиода (что позволит использовать меньшие токи инжекции) необходимо применять металлические рефлекторы и детали вторичной оптики типа асферических неизображающих охватывающих линз или рефлекторов полного внутреннего отражения. Правильно расположив светодиод относительно направления движения транспортного средства, можно вообще отказаться от средств формирования четкой светотеневой границы за счет совмещения рефлектора и шторки заданной формы. Металлические рефлекторы можно дополнительно использовать как пассивную систему охлаждения.

Конструкция светодиодной фары, построенная с применением указанных принципов, будет иметь следующие достоинства:

- Практически весь световой поток светодиода будет использоваться при освещении дороги,

так как в конструкции отсутствует шторка, блокирующая часть светового потока.

- Потери света на отражение будут несколько уменьшены путем применения полного внутреннего отражения в деталях вторичной оптики.

- За счет более полного использования светового потока можно будет уменьшить ток инжекции светодиода и таким образом понизить его температуру, что позволит не использовать принудительное активное охлаждение и улучшить надежность изделия.

- Масса изделия будет меньше за счет отказа от активного охлаждения и массивной проекционной линзы из стекла.

### Литература

1. Ulrich, L. Audi Pixelated Laser Headlights Light the Road and Paint It Too / L. Ulrich // IEEE Spectrum [Electronic resource]. – 2015.

2. Bhardwaj, Ju. Advanced LED technology for automotive applications / Ju Bhardwaj, R. Peddada, B. Spinger // SPIE [Electronic resource]. – 2017.

УДК 621.382.002

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOC ИОННО–ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ SiO<sub>2</sub>/C

Телеш Е.В., Дуксин М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Бурное развитие различных областей радиоэлектроники, характерное для последних десятилетий, связаны с поиском новых материалов и разработкой технологии получения изделий на их основе. Это касается и диэлектриков – требуется применения для межуровневой изоляции диэлектрических слоёв с низким значением диэлектрической проницаемости. Это необходимо для уменьшения потребляемой мощности и увеличения быстродействия в сверхбольших интегральных схемах с размерами элементов менее 0,1 мкм [1]. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их углеродом [2]. Углеродсодержащие диэлектрические покрытия чаще всего получают методом химического осаждения из газовой фазы, однако это связано с определёнными трудностями. Такие плёнки сильно адсорбируют воду, что является недопустимым для межуровневого диэлектрика.

В данной работе плёнки SiOC формировались ионно–лучевым распылением составной мишени SiO<sub>2</sub>/12,5 %C. Распыляемая мишень представляла собой диск из кварца высокой чистоты (ТУ0284409–108–85) диаметром 60 мм и толщиной 4 мм. В кварце был вырезан сегмент, вместо которого был помещен одинаковый по площади фрагмент из плотного графита высокой чистоты марки МПГ-7 ТУ 1915-051-00200851-2005 (рисунок 1).

Нанесение пленок осуществлялось в модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащённой ионно–лучевым источником на основе ускорителя с анодным слоем. Остаточный вакуум не превышал  $4,2 \cdot 10^{-3}$  Па. Рабочими газами служили аргон и кислород. Плёнки формировались на подложках из стекла К8, кремния и кремния, покрытого пленкой никеля. Толщина покрытий определялась с помо-

щью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Компенсация положительного заряда на мишени осуществлялась термоэлектронами. Электрофизические характеристики покрытий исследовались с применением МДМ–структур. Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись на частоте 1 МГц с помощью прибора Е7-20, а пробивное напряжение с применением характеристики графа TR-4805.

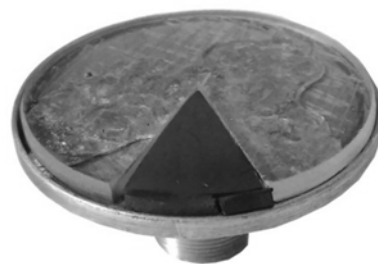


Рисунок 1 – Внешний вид составной мишени SiO<sub>2</sub>/12,5 %C

Толщина пленок составляла 270–300 нм, скорость нанесения – 0,77 нм/с, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток термокомпенсатора – 12 А. Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик пленок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик пленок SiOC

| Po <sub>2</sub> , Па | T <sub>н</sub> , К | ρ <sub>v</sub> , Ом·м | tgδ   | ε   | E <sub>пр</sub> , В/см |
|----------------------|--------------------|-----------------------|-------|-----|------------------------|
| –                    | 343                | 37·10 <sup>3</sup>    | 0,031 | 4,0 | 8,13·10 <sup>6</sup>   |
| 8,0·10 <sup>-3</sup> | 343                | 70·10 <sup>3</sup>    | 0,025 | 3,8 | 6,86·10 <sup>6</sup>   |
| 1,4·10 <sup>-2</sup> | 343                | 83·10 <sup>3</sup>    | 0,034 | 3,8 | 9,43·10 <sup>6</sup>   |
| –                    | 403                | 64·10 <sup>3</sup>    | 0,025 | 4,0 | 6,50·10 <sup>6</sup>   |
| –                    | 493                | 50·10 <sup>3</sup>    | 0,029 | 4,1 | 7,26·10 <sup>6</sup>   |
| –                    | 583                | 37·10 <sup>3</sup>    | 0,032 | 4,2 | 6,29·10 <sup>6</sup>   |

Установлено, что добавка кислорода к аргону способствует некоторому снижению величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , увеличению электрической прочности и удельного объемного сопротивления. Повышение температуры подложки привело к увеличению  $\epsilon$ , снижению удельного объемного сопротивления и электрической прочности.

Установлено, что концентрация углерода в пленке недостаточна для существенного снижения диэлектрической проницаемости. Поэтому необходимо увеличить площадь графитового сегмента до 20–25 %.

На рисунках 2–3 приведены спектральные зависимости пропускания и поглощения пленок SiOC, полученных при разных режимах.

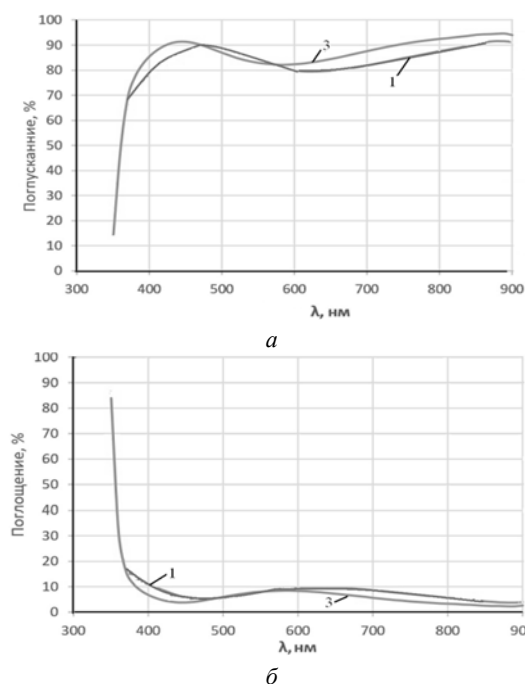


Рисунок 2 – Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б) пленок SiOC, полученных при разных давлениях кислорода

На рисунке 4 представлены ИК спектры пропускания пленок SiOC, полученных при разных режимах. На спектре имеются следующие три характерные полосы поглощения SiO<sub>2</sub>:  $\nu_{as} = 1085 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям Si  $\leftarrow\rightarrow$  O  $\leftarrow$  Si,  $\nu_s = 820 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным симметричным колебаниям Si  $\rightarrow$  O  $\leftarrow$  Si,  $\delta_{as} = 450 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям Si – O – Si. Также на спектре имеется четко выраженная полоса поглощения кремниевой подложки с частотой  $\sim 607 \text{ см}^{-1}$ .

Добавка кислорода к аргону позволила несколько увеличить пропускание и снизить поглощение в ближнем ИК диапазоне. Нагрев подложки способствовал росту пропускания в видимом диапазоне (500–600 нм).

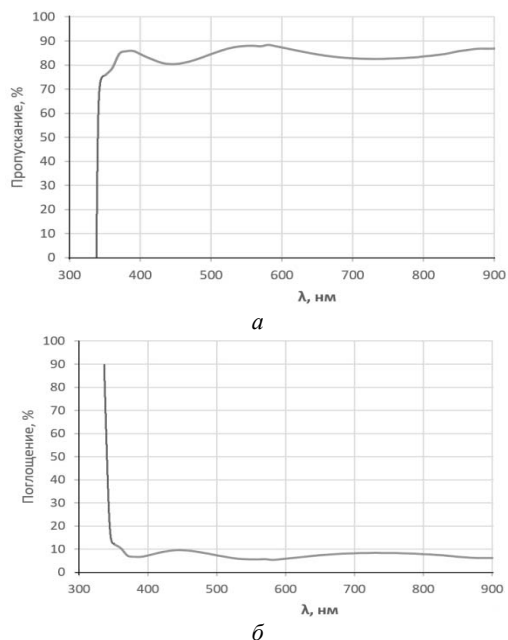


Рисунок 3 – Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б) пленки SiOC, полученной при температуре подложки 583 К

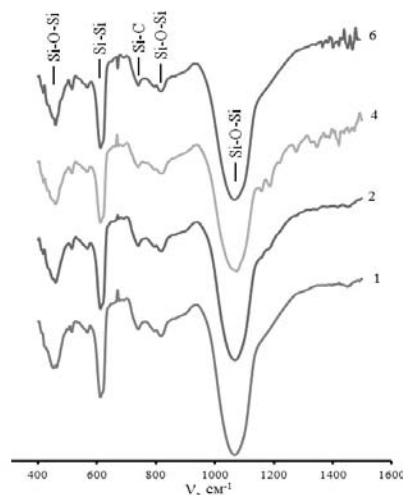


Рисунок 4 – ИК спектры пропускания пленок SiOC, полученных при различных режимах

Установлено наличие полосы поглощения карбида кремния Si–C на частоте  $\sim 740 \text{ см}^{-1}$ . Поглощения на  $\nu = 1020\text{--}1090 \text{ см}^{-1}$  связи Si–O–C (оксикарбид кремния) обнаружено не было.

### Литература

1. Murarka, S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S.P. Murarka // Solid State Technology. – 1996. – № 3. – P. 83–89.
2. Kim, H.J. Characterization of low-dielectric-constant SiOC thin films deposited by PECVD for interlayer dielectrics of multilevel interconnections / H.J. Kim, Q. Shao, Y-H. Kim // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V. 171. – P. 39–45.

УДК 621

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОТОЧНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

**Фильчук А.С., Воропай Е.В., Козерук А.С., Кузнецик В.О.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Из анализа рассматриваемой схемы обработки конических поверхностей (рисунок 1) следует, что скорость скольжения  $v$  в произвольной точке  $M$  детали выражается векторным соотношением:

$$\vec{v} = \vec{v}_и - \vec{v}_п - \vec{v}_д - \vec{v}_в, \quad (1)$$

в правой части которого записаны векторы линейных скоростей вращательных движений инструмента 2  $\vec{v}_и$ , планшайбы 3  $\vec{v}_п$ , детали 1  $\vec{v}_д$  и возвратно-вращательное перемещение штанги 8  $\vec{v}_в$  выходного звена 7. В нашем случае эти скорости имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{v}_и = \vec{\omega}_и \times \vec{r}_и, \vec{v}_п = \vec{\omega}_п \times \vec{r}_п \\ \vec{v}_д = \vec{\omega}_д \times \vec{r}_д, \vec{v}_в = \vec{\omega}_в \times \vec{l}_п \end{cases} \quad (2)$$

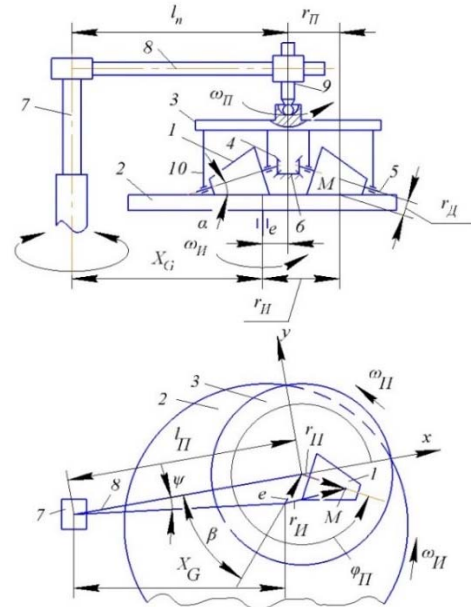
где  $\vec{\omega}_и, \vec{\omega}_п, \vec{\omega}_д, \vec{\omega}_в$  и  $\vec{r}_и = e + \vec{r}_п, \vec{r}_п, \vec{r}_д$  – векторы угловых скоростей инструмента, планшайбы, детали и радиус-векторы рассматриваемой точки  $M$  относительно их оси симметрии;  $l_п$  – расстояние между осями симметрии поводка 9 и выходного звена 7;  $e = \sqrt{l_п^2 + X_G^2 - 2X_G l_п \cos \psi}$  – текущее значение расстояния между осями инструмента и планшайбы;  $X_G$  – расстояние между осями вращения выходного звена 7 и инструмента 1;  $\psi$  – угол поворота штанги 8 от исходного положения;  $\psi'$  – угловая скорость возвратно-вращательного движения штанги 8;  $\psi$  – угол поворота штанги 8 от исходного положения (рисунок 1).

Закон изменения  $\psi'$  определяется типом исполнительного механизма. В рассматриваемом устройстве в качестве последнего применяется четырехзвенник. Для него  $\psi' = \omega_2 i_{42}$ . [1]

Используя проекции векторов, входящих в уравнения (2), которые представлены выше, на оси системы координат  $XYZ$ , начало которой находится на центральной оси планшайбы 3, а ось  $X$  совпадает с осевой линией штанги 8 и выполнив соответствующие преобразования, проекции скорости скольжения  $v$  на оси системы координат  $XYZ$  согласно соотношению (2) запишем в виде:

$$\begin{aligned} v_x &= -\omega_и(r_и \sin \varphi_п + e \sin \beta) + (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \sin \varphi_п, \\ v_y &= \omega_и(r_и \sin \varphi_п + e \cos \beta) - (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \sin \varphi_п - \\ &\quad \psi' l_п, \\ v_z &= 0, \end{aligned}$$

где  $\varphi_п$  – угол поворота планшайбы 3 относительно оси  $X$ ;  $\beta = \arccos \frac{l_п^2 + e^2 - X_G^2}{2l_п e}$  – угол между осевой линией штанги 8 и прямой, проходящей через ось симметрии инструмента 2 и планшайбы 3.



1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – планшайба; 4, 6 – шестерни; 5 – центра; 7 – выходное звено; 8 – штанга; 9 – поводок; 10 – дополнительные устройства

Рисунок 1 – Размерная цепь рабочей зоны устройства

Используя последние уравнения, по формуле:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

можно определить модуль скорости скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности.

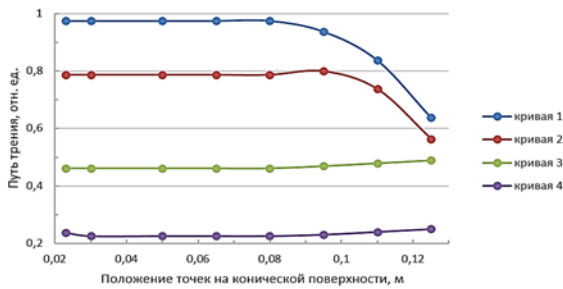
Зная скорость скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности по формуле (3) рассчитывается путь трения, по которому определяется интенсивность процесса формообразования.

$$L = v * t_{\text{обработки}} \quad (3)$$

Учитывая изложенную выше математическую модель, был проведен расчет распределения путей трения  $L$  по образующей конуса для различных геометрических и кинематических наладочных параметров разработанного устройства. Принимались следующие размеры конической детали: высота конуса – 125 мм, минимальный диаметр – 20 мм, максимальный диаметр – 50 мм. Диаметр инструмента составлял 350 мм.

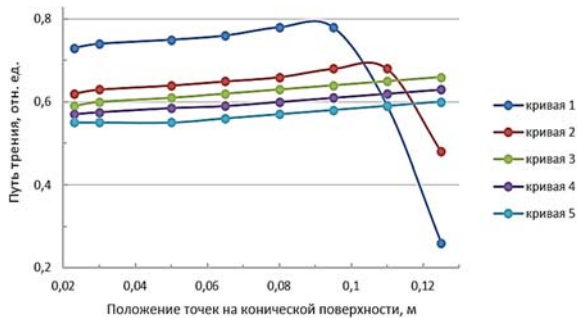
На рисунке 2 представлены закономерности распределения путей трения для различной величины размаха  $L$ . Из рисунка видно, что при  $L = 190$  мм (кривая 1) наблюдается отставание

съема припуску при вершине конуса, в результате чего в этом месте детали появляется приподнятость образующей. При размахе 160 мм (кривая 2) размер зоны с отклонением  $L_{отн}$  от равномерного распределения, и величина этого отклонения примерно такая же, а в случае  $L = 100$  мм (кривая 3) скорость скольжения принимает практически одинаковые значения по всей длине образующей конуса. Однако, если  $L$  принять равным 40 мм (кривая 4), то равномерность распределения скорости скольжения ухудшается.



1 –  $L = 190$  мм, 2 –  $L = 160$  мм, 3 –  $L = 100$  мм,  
4 –  $L = 40$  мм при  $\omega_2 = 2,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_n = 1,04 \text{ с}^{-1}$  и  $l = 0$  мм

Рисунок 2 – Значения путей трения  $L$  в разных точках поверхности



1 –  $l = 50$  мм, 2 –  $l = 30$  мм, 3 –  $l = 20$  мм, 4 –  $l = 10$  мм,  
5 –  $l = 0$  мм при  $\omega_2 = 2,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_n = 1,04 \text{ с}^{-1}$  и  $L = 100$  мм

Рисунок 3 – Значения путей трения  $L$  в разных точках  $h$  поверхности

Распределение пути трения в зависимости от величины  $l$  смещения траектории возвратно-вращательного перемещения оси симметрии верхнего звена относительно центра инструмента

УДК 535-31

## АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ МИНИМИЗАЦИИ ИНВЕРСНОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИИ ТКАНЕЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

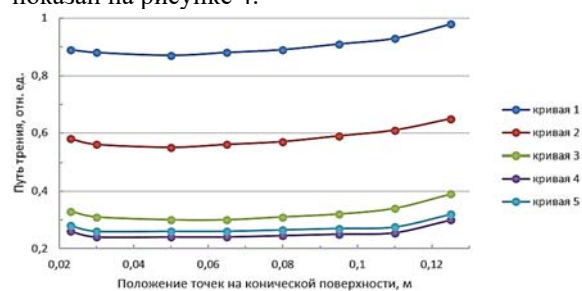
Чавченко К.Б.

Национальный технический университет Украины Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Фотометрия эллипсоидальными рефлекторами является методом биофотоники, позволяющая идентифицировать состояние исследуемых биологических тканей путем определения их оптических свойств. К таким свойствам принято от-

приведено на рисунке 3. Полученные данные показывают, что при  $l = 50$  мм (кривая 1) имеет место сильное замедление съема припуску в зоне небольшой ширины у вершины конуса. Размер этой зоны и величина отклонения  $L$  от равномерного распределения уменьшаются с назначением смещения 30 мм (кривая 2). Если принять  $l = 20$  мм (кривая 3), то наблюдается практически одинаковое значение  $L$  во всех точках обрабатываемой поверхности. Дальнейшее уменьшение  $l$  до 10 (кривая 4) и 0 мм (кривая 5) еще в большей степени способствует выравниванию скорости скольжения.

Характер распределения путей трения для различной частоты вращения инструмента  $\omega_n$  показан на рисунке 4.



1 –  $\omega_n = 3,1 \text{ с}^{-1}$ , 2 –  $\omega_n = 2,6 \text{ с}^{-1}$ , 3 –  $\omega_n = 2,1 \text{ с}^{-1}$ ,  
4 –  $\omega_n = 1,6 \text{ с}^{-1}$ , 5 –  $\omega_n = 1,04 \text{ с}^{-1}$   
при  $\omega_2 = 2,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 100$  мм,  $l = 0$  мм

Рисунок 4 – Значения путей трения  $L$  в разных точках  $h$  конической поверхности

Видно, что изменение  $\omega_n$  при оптимальных  $L$  и  $l$  существенно влияет на абсолютное значение путей трения и в значительно меньшей степени на ее распределение вдоль образующей конуса. Это значит, что частоту вращения инструмента следует назначить исходя из стадии обработки.

## Литература

1. Козерук А.С., Филонов И.П., Климович Ф.Ф. Управление формообразованием прецизионных деталей машин и приборов. Учебное пособие в 4-х частях. Часть 1. Математическое моделирование формообразования прецизионных поверхностей. – Минск : БГПА, 1996. – 146 с.

же отнесенные коэффициенты. Само же определение оптических свойств биологической ткани (БТ) производится различными итерационными методами и является достаточно трудоемкой задачей. Это прежде всего объясняется сложностью структуры самой ткани и многообразием учтенных процессов взаимодействия фотонов в ней.

В оптической биометрии сред большинство исследуемых биологических объектов относятся к оптически мутным неоднородным средам. За счет многократного рассеяния и поглощения в биологической ткани лазерный пучок уширяется и затухает при распространении [1]. Если оптические свойства биологической ткани для отдельной длины волны известны, тогда отраженный и пропущенный свет может быть рассчитан с помощью теории переноса излучения (ТПИ) [2]. Теория переноса излучения рассматривает многократные процессы рассеяния и поглощения, которые описываются стационарным и нестационарным уравнением переноса излучения.

В оптике БТ широкое применение имеют относительно простые методы решения уравнения переноса, такие, как двухпотоковая модель Кубелки-Мунка, трех-, четырех- и семи- потоковые модели. Преимуществом которых является простота и возможность простых расчетов дозы облучения и быстрого определения оптических параметров биоткани (решение обратной задачи рассеяния) за счет снижения точности расчетов [3].

На практике необходима надежная послынная дозиметрия пучка лазерного излучения внутри биоткани. Проблемы оптической диффузной томографии и спектроскопии биообъектов определяют необходимость развития методов решения прямых и обратных задач переноса излучения для сред с произвольной конфигурацией и любыми граничными условиями. Для решения таких задач применяются методы прямого и инверсного Монте-Карло, которые решают численное уравнение транспортного переноса излучения в оптике биотканей.

Моделирование распространения света методом Монте-Карло является гибким, но строгим подходом для имитации распределения света. Метод Монте-Карло базируется на численном моделировании транспорта фотонов в рассеивающей среде. Случайное блуждание фотонов внутри образца биоткани прослеживается от точки влета в образец до его поглощения или выхода из образца. Известные алгоритмы позволяют учесть несколько слоев биоткани с различными оптическими свойствами, конечный размер падающего пучка, отражение света от границ раздела слоев [4-7]. Примерами многослойных биотканей являются кожа, стенки кровеносного сосуда и др.

Инверсный метод Монте-Карло заключается в последовательном пересмотре гипотез о соответствии определенных значений оптических

свойств к БТ, полученных при решении прямой задачи транспортного переноса излучения методом прямого Монте-Карло со спецификой использования для фотометров с эллипсоидальными рефлекторами [5-7], технология изготовления и контроля на данный момент достаточно хорошо разработана [8, 9]. Итерационная процедура повторяется до момента, пока не будут подобраны значения оптических параметров, при которых в результате решения прямой задачи транспортного переноса отклик исследуемой мутной среды будет максимально приближен к экспериментальным данным, полученным при измерении коэффициентов отражения и пропускания [5].

Экспериментально измеренные коэффициенты диффузного отражения, полного и коллимированного пропускания являются исходными данными для определения свойств БТ. Задача расчета этих параметров может быть сформулирована как задача оптимизации, которая состоит в минимизации некоторой целевой функции (критерия оптимизации) путем подбора соответствующих численных значений оптических свойств. Целевая функция представляет собой сумму относительных ошибок определения коэффициентов диффузного отражения и полного пропускания, которые получены при решении прямой задачи на каждом шаге расчета. Новые значения фактора анизотропии и альbedo в каждой итерации поиска оптимального значения определяются методом «золотого сечения».

Подбор целевой функции оптимизации в инверсном Монте-Карло для метода зеркальных эллипсоидов вращения позволяет минимизировать общую погрешность определения оптических коэффициентов полного пропускания и диффузного отражения при реальном и модельном экспериментах.

Для проверки точности функций минимизации с помощью эксперимента были получены оптические свойства для тканей легких и печени свиньи с толщиной, которая обеспечивала близкое к нулю значение коэффициента пропускания, т. е. имитировала полу-бесконечную среду. На основании полученных свойств была проведена серия моделирований для пяти функций оптимизации: модульной (на рис. 1 и рис. 2 метка М), квадратичной (на рис. 1 и рис. 2 метка КВ), квадратичной по дельтам диффузного отражения и полного пропускания (на рис. 1 и рис. 2 метка КВ2), квадратичной по относительным погрешностям суммы диффузного отражения и полного пропускания (на рис. 1 и рис. 2 метка КВ3), логарифмической (на рис. 1 и рис. 2 метка Л).

Основным параметром функций оптимизации была сумма относительных погрешностей коэффициентов диффузного отражения и полного пропускания которые образуют относительную погрешность. Относительная погрешность функций оптимизации для легких свиньи показана на рисунке 1, а для печени свиньи на рисунке 2.



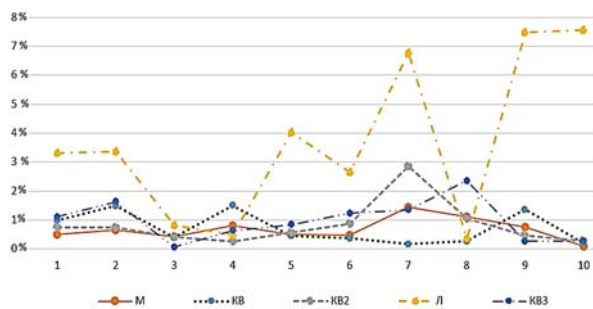


Рисунок 1 – Относительные погрешности пяти функций оптимизации для тканей легких свиньи

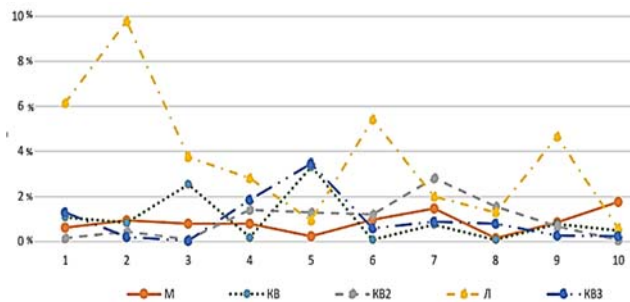


Рисунок 2 – Относительные погрешности пяти функций оптимизации для тканей печени свиньи

Из полученных графиков видно, что для обеих тканей логарифмическая функция имеет наибольшую погрешность. Лучше всего себя проявила модульная функция, которая для обоих случаев имеет наименьшую погрешность без сильных скачков для разных значений коэффициента экстинкции. Рассмотренные виды квадратичной функции минимизации исходя из графиков имеют практически одинаковую погрешность, которая немного больше чем у модульной функции. Таким образом, изменение коэффициента экстинкции не особо влияет на погрешность определения оптических свойств для рассмотренных образцов БТ при использовании метода зеркальных эллипсоидов вращения.

УДК 621.793

## АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОТОПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Навицкий А.Н.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>1</sup>, Акула И.П.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

### Введение

При изготовлении высокоточной оптической аппаратуры, такой как телескопы, спектрометры, радиометры, устройства оптического зондирования Земли и др. приборы необходимо использовать поглощающее покрытие, предназначенное для того, чтобы избавиться от шумов, которые появляются при рассеивании света на корпусных деталях оптической аппаратуры.

- ### Литература
1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. Саратов, 1998.
  2. Оптическая биомедицинская диагностика. Т.1 / Перевод под ред. В.В. Тучина. – М. : Физматлит, 2006. – 560 с. ISBN 5-9221-0769-0.
  3. Тучин В.В. Исследование биотканей методами светорассеяния / Успехи физических наук, том 167. – 1997. – № 5. – С. 517–540.
  4. Голубцов А.А. Описание процессов переноса излучения в рассеивающих средах с использованием макроскопических оптических характеристик // Сборник материалов V МНПК – Чебоксары, 2015.

5. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, I.V. Helich, «Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media», Appl Opt., no. 56 (30), pp. 8520–8526, 2017.

6. М.А. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk, «Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors», Devices and Methods of Measurements. 9(1):56–65, 2018.

7. Bezuglyi M., N. Bezuglaya and A. Viruchenko. «On the possibility of ellipsoidal photometry and Monte Carlo simulation to spatial analysis of biological media». Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2017 IEEE 37th International Conference on. IEEE, 2017.

8. Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Сиявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2016. – № 2 (52). – С. 76–81.

9. Безуглий М.О. Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів / М.О. Безуглий, Лінючева О.В., Безугла Н.В., Бик М.В., Костюк С.А // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017, № 1 (53). – С. 62–69.

Одним из наиболее эффективных в этом плане материалов является аморфное алмазоподобное углеродное (АПУ) покрытие.

Алмазоподобный углерод относится к тонкопленочным материалам, получаемым вакуумными методами. По своей структуре он представляет собой аморфный материал, в котором атом углерода связан с соседними атомами четырьмя ковалентными  $sp^3$  гибридами-зированными сигма-

связями, т. е. ближний поря-док у него такой же, как и в структуре алмаза. Однако часть атомов АПУ покрытия образует ковалентные  $sp^2$  гибри-дизированные связи, как и в структуре графита. В зависимости от метода и условий синтеза покры-тий возможно в очень широких пределах изменять их механические и физические свойства [1].

Преимуществом данных покрытий является повышенная твердость относительно других по-крытий, которая варьирует в пределах 20 - 80 ГПа, низкий коэффициент термического расши-рения (КТР) порядка  $(1,7-3,5) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [2], а так-же их инертность к атомарному кислороду [3].

#### Метод получения покрытий

Для нанесения АПУ покрытий был использован комбинированный метод PVD-CVD осаждения, основанный на создании вторичной плазмы в среде газов углеводородов под воздействием ионизи-рованных частиц катодно-дугового разряда.

Сущность метода состоит в возможности осуществления плазмостимулированного оса-ждения из газовой фазы, используя ионизи-рованные частицы импульсного катодно-дугового разряда. Комбинированный метод позволяет существенно повысить скорость осаждения АПУ покрытий по сравнению с обычным не гибри-дным PVD методом, так как помимо графитового источником осаждения углерода является угле-родсодержащий газ, в качестве которого чаще всего используется ацетилен [4].

АПУ покрытия осаждались при давлении ацетилена 0,5–1 Па на корпусные детали из сплава «Инвар» (36 % Ni + Fe). Путем регули-ровки давления подаваемого газа в вакуумной камере удастся формировать покрытия с требу-емыми свойствами.

#### Методы исследования покрытий

Основным объектом исследования являются оптические свойства АПУ покрытий, получен-ных при различных давлениях ацетилена, кото-рые исследовались на спектро-фотометрах Hitachi U-3400 и Cary 500. Спектрофотометр Hitachi U-3400 оснащен двойной системой моно-хроматоров и выдает точность измерений длин волн для УФ и видимого диапазона 0,2 нм и 1 нм для ближнего ИК излучения. Данный оптический прибор был использован для определения коэф-фициента отражения. С помощью спектрофото-метра Cary 500 (производство фирмы Varian) со спектральным разрешением 0,5 нм были получены спектры пропускания АПУ покрытий.

Не менее важной характеристикой материала является его твердость. Исследования микротвер-дости проводились на приборе ПМТ-3, в основу которого вложен принцип вдавливания алмазной пирамиды (индентор Кнупа). Алмазная пирамида имеет ромбическое основание с углом между про-тивоположными ребрами  $172,5 \pm 0,8^\circ$  и  $130 \pm 0,08^\circ$ . Отпечатки имеют вид сильно вытянутого ромба, большая диагональ в 7 раз превышает малую, глубина отпечатка в 30 раз меньше большей диа-

гонали, что обуславливает повышенную точность при малых нагрузках. Благодаря особенностям своей формы, ромбическая пирамида не вызывает трещин и скалывания по краям отпечатка.

#### Результаты исследования покрытий

На представленных ниже графиках показаны результаты проведенных исследований АПУ покрытий.

На рисунке 1 можно отметить существенный рост коэффициента поглощения в диапазоне дав-ления газа 0 ... 0,35 Па, что в 2,7 раза выше, чем при отсутствии газа; при дальнейшем увеличении давления, коэффициент поглощения все также возрастает, но темп его роста значительно ниже.

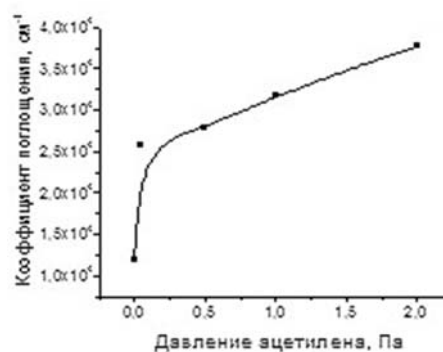


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента поглощения от давления ацетилена в вакуумной камере

Обратную зависимость от давления имеет ко-эффициент отражения (рисунок 2). Его суще-ственное изменение наблюдается в области дав-лений до 1 Па.

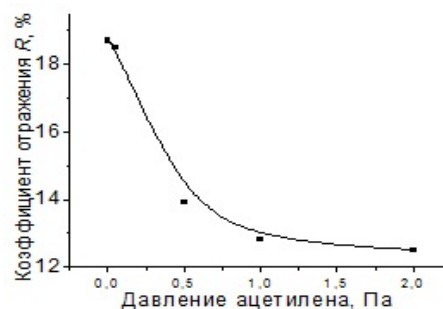


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражения от давления ацетилена в вакуумной камере

Усиление коэффициента поглощения обу-славливается наличием в структуре АПУ покры-тий небольших кластеров с преимущест-венной  $sp^2$  гибридизацией [5]. Это также является при-чиной размягчения покрытий (рисунок 3).

При 0,05...0,5 Па происходит наиболее за-метное снижение твердости с 79 до 26 ГПа. При давлении  $\text{C}_2\text{H}_2$  выше 0,5 Па характер зави-симости твердости АПУ покрытий изменяется на более пологий и стабилизируется на уровне порядка 20 ГПа.

Таким образом, оптимальным давлением для получения АПУ покрытий является диапазон 0,3...1 Па. В этом диапазоне коэф-фициент погло-

щения имеет максимальный прирост, а твердость получаемого покрытия имеет значение 25 ГПа.

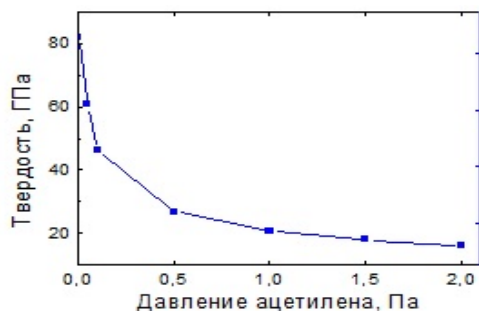


Рисунок 3 – Зависимость твердости АПУ покрытия от давления ацетилена

В силу того, что корпусные детали фотоприемника изготавливаются из инвара с низким КТР  $\alpha = (1,7-2,8) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , применение АПУ покрытия является оптимальным, т.к. оно обладает схожим КТР.

#### Заключение

Представленные в данной работе метод осаждения и результаты исследования полученных АПУ показывают, что алмазоподобные углеродные покрытия обладают рядом свойств, которые могут быть использованы с большой эффективностью в оптических устройствах, применяемых в космической технике в качестве поглощающих

антибликовых покрытий корпусных деталей фотоприемников оптического излучения.

#### Литература

1. Yuto, S. Tanaka. Diamond-like carbon films: NOVA Science Publisher. New York, 2011.
2. Vetter, J. 60 years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications // Surface and Coatings Technology – 2014. – V. 257. – P. 213–240.
3. Tagawa, M., Yokota, K., Matsumoto, K. Space environmental effects on MoS<sub>2</sub> and diamond-like carbon lubricating films: Atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties // Surface and Coatings Technology – 2007. – V. 202. – № 4. – P. 1003–1010.
4. Чекан, Н.М., Акулич, В.В., Акула, И.П. Новый комбинированный метод получения алмазоподобных пленок // Материалы II Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, Беларусь, ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (отв.ред.) [и др.]. Минск, 2007. – Т. 2. – С. 148–158.
5. Sukosin, Th., Frank, H. L. Koppens, F. Javier Garcia de Abajo. Total light absorption in graphene. [http://arxiv.org/PS\\_cache/arxiv/pdf/1106/1106.4460v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1106/1106.4460v1.pdf).

УДК 666.193

### ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗАЛЬТОВУЮ ТКАНЬ

Анисович А.Г.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Журавлева В.И.<sup>2</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

#### Введение

Лазерное воздействие на различные химические волокна широко используется в технологических процессах изготовления изделий. Использование лазерного излучения (ЛИ) предоставляет возможность решать сложные технологические и технические задачи. В основе процесса лазерного воздействия на химические волокна минерального происхождения лежат термохимические и термофизические механизмы разрушения материалов. Эффективность лазерного разрушения материалов зависит от количества поглощенной энергии при определенной плотности мощности. На процесс разрушения материалов большое влияние оказывают теплофизические свойства материала. Для большинства базальтовых тканей теплопроводность лежит в пределах 0,031–0,038 (Вт/м·К). Данные ткани являются плохими проводниками тепла и эффекты, связанные с разрушением материала, являются поверхностными.

Целью данной работы является исследование морфологии базальтовой ткани при лазерном воздействии. Исследовалась базальтовая ткань, выпускаемая открытым акционерным обществом «Полоцк-Стекловолокно».

#### Методы проведения исследований

Исследования морфологии образцов проводились с помощью металлографического микроскопа МИ-1. Данный микроскоп использовался в различных режимах: светлое поле в отраженном свете и поляризационного контраста в отраженном свете.

Элементный анализ проводился с помощью системы энергодисперсионного (EDS) микроанализа, установленной на сканирующем электронном микроскопе SEM 515. Этот комплекс, в состав которого входят Si(Li) детектор со сверхультратонким окном, охлаждаемый жидким азотом, компьютер и пакет программного обеспечения Genesis SEM Quant ZAF software.

Измерения проводились при различных значениях ускоряющего напряжения: от минимального порога чувствительности системы микроанализа (6,4 кВ) до максимального значения ускоряющего напряжения, равного 30 кВ.

#### Результаты исследований

На рисунках 1-3 приведена морфология структуры базальтовой ткани до и после лазерного воздействия при различной падающей энергии. Процесс разрушения материала в значительной мере зависит от мощности лазерного излучения.

После воздействия с энергией 60 Дж (рис. 1б, 2а) наблюдается обрыв пакетов волокна и смещение прилегающих участков ткани. На концах волокон формируются капли расплава (рис. 2б). Оплавление носит местный характер, расплавленная фаза концентрируется на концах волокон.

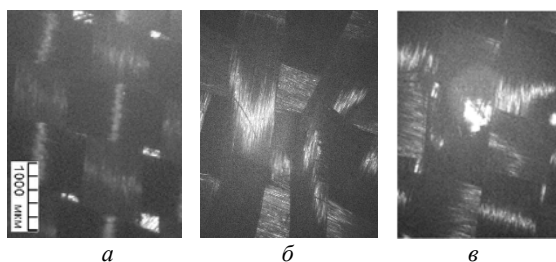
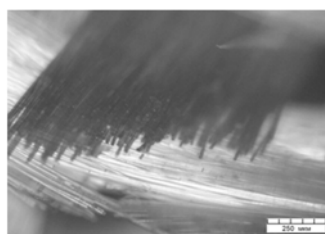
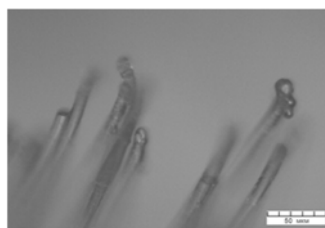


Рисунок 1 – Макроструктура ткани: *а* – исходное состояние, *б, в* – падающая энергия 60 и 240 Дж, соответственно

При использовании энергии 240 Дж смещения фрагментов волокна не происходит (рис. 2, а,в). Начинается разрушение базальтовой ткани и формируется сквозное отверстие диаметром порядка 450 мкм.



*а*



*б*

Рисунок 2 – Разрушение волокна при значении падающей энергии 60 Дж: *а* – обрыв волокон, *б* – оплавление отдельных волокон

С увеличением плотности мощности процесс деструкции материала нарастает, и на рис. 3 можно видеть оплавленные края при пробивании отверстия и множественные капли материала,

сформировавшиеся вблизи отверстия; средний размер капель составляет ~ 4 мкм. Сплошной край отверстия при этом формируется застывшим материалом.

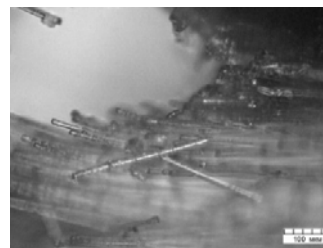
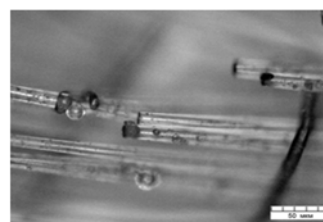
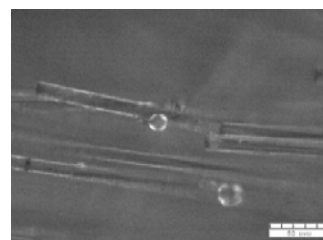


Рисунок 3 – Разрушение волокна при значении падающей энергии 240 Дж

Отдельные капли расплава размером порядка 10 мкм можно наблюдать на некотором удалении от края отверстия (рис. 4а). При данном режиме воздействия капли оптически прозрачны и имеют достаточно совершенную сферическую форму. Это подтверждается тем, что при анализе в поляризованном свете (рис. 4б) формируется коноскопическая фигура аналогично таковой при исследовании одноосных кристаллов [1]. Также появление таких фигур наблюдалось на оптически прозрачных включениях в сталях [2], а также сферических дефектах в неметаллических материалах [3] при освещении поляризованным светом.



*а*



*б*

Рисунок 4 – Капли базальтового материала: *а* – светлполюсное изображение, *б* – поляризованный свет

При использованных режимах лазерного воздействия реализуются условия образования низкотемпературной плазмы, температура при этом значительно превышает температуру, при которой происходит плавление окислов, температуру термической деструкции. Элементный состав при этом не изменяется.

#### Выводы

Проведено лазерное воздействие и диагностирована базальтовая ткань до и после лазерного воздействия при вложенной энергии 60-240 Дж и времени воздействия 1-4 мин. Показа-

но, что при этом происходит разрушение базальной ткани в результате расплавления материала под действием концентрированного потока лазерного излучения.

#### Литература

1. Татарский, В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод / В.Б. Татарский. – М. : Недра, 1965. – 306 с.

2. Червяков, А.Н. Металлографическое определение включений в стали / А.Н.Червяков, С.А. Киселева, А.Г. Рьльникова. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 248 с.

3. Анисович, А.Г. Оптические эффекты при микроскопии металлов и неметаллических материалов. Литье и металлургия, 4(89) 2017. – С. 119–125.

УДК 620.179.14

### ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ 40X Бурак В.А.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Использование многопараметровых моделей, построенных на основе статистических подходов к обработке данных, в неразрушающем контроле позволяет расширить область применения и повысить точность и надежность применяемых методов и средств контроля. Импульсный магнитный метод, заключающийся в намагничивании контролируемого изделия одним или сериями импульсов и измерении величины поля остаточной намагниченности, при наличии достаточного числа данных, позволяет не только устанавливать корреляционные связи между измеренными магнитными параметрами и структурным состоянием или температурой термообработки ферромагнитных изделий и материалов, но и получать регрессионные модели [1].

В импульсном магнитном анализаторе ИМА-6 [2] реализована следующая схема намагничивания: контролируемое изделие с целью уменьшения влияния магнитной предыстории намагничивается парой импульсов магнитного поля противоположного направления, амплитуда которых составляет 250 кА/м, что обеспечивает намагничивание практически до технического насыщения конструкционные марки сталей, а затем дважды перемагничивается импульсами магнитного поля с заданной оператором амплитудой, но не большей 250 кА/м. Программное обеспечение прибора ИМА-6 позволяет фиксировать значение градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после воздействия пары импульсов максимальной для прибора амплитуды магнитного поля и после каждого из перемагничивающих импульсов, формируя для каждого контролируемого изделия массив из трех величин, которые могут быть использованы при построении многопараметровых моделей.

Для исследований влияния величины амплитуды импульсов магнитного поля, формируемых прибором ИМА-6 на точность многопараметровой модели оценки качества термообработки, был взят комплект образцов стали 40X, имею-

щих форму дисков диаметром 63 мм и толщиной 9 мм, закаленных от 810 °С и отпущенных при разных температурах.

Использование при перемагничивании импульсов малой амплитуды незначительно меняет вид кривой зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности, полученной после намагничивания двумя импульсами максимальной амплитуды и разного направления, от температуры отпуска, но несколько снижает величины градиентов поля остаточной намагниченности. Выбор амплитуды, сравнимой по величине с максимальной амплитудой в серии импульсов, используемых для получения измеренных данных при многопараметровом магнитном контроле, также не вносит значительных изменений в вид кривой зависимости после намагничивания первыми двумя импульсами в серии, меняя только её положение на противоположное относительно линии нулевой намагниченности.

Особый интерес для многопараметрового контроля качества термообработки стали 40X представляют такие амплитуды перемагничивающих импульсов, при которых величина измеренного градиента напряженности остаточного магнитного поля лежит в области, близкой к нулевому его значению в какой-либо из рассматриваемых температур термообработки. Известно [3-4], что при использовании для контроля температуры отпуска среднеуглеродистых конструкционных сталей двух градиентов напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания до технического насыщения и дальнейшего частичного перемагничивания импульсом меньшей амплитуды, чем требуется для технического насыщения, хороший результат дает выбор такой амплитуды второго намагничивающего импульса, при которой градиент напряженности поля остаточной намагниченности после импульсного намагничивания близок к нулю на образце или изделии, отпущенном при самой низкой или самой высо-

кой из рассматриваемых температур, то есть на самом мягком или самом твердом образцах.

Одним из возможных для многопараметрового импульсного контроля сочетаний величин амплитуд перемагничивающего поля является выбор первой из двух изменяющихся перемагничивающих амплитуд такой, чтобы образец, отпущенный при минимальной температуре, после воздействия импульсом магнитного поля имел градиент остаточной намагниченности, близкий к нулю, а вторую амплитуду выбрать такую, чтобы величина градиента остаточной намагниченности была близкой к нулю для образца, отпущенного при максимальной из рассматриваемых температур отпуска. Для стали 40X величины таких амплитуд импульсов магнитного поля составляют 100 кА/м и 25 кА/м, вид кривой зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска представлен на рисунке 1. Применение такой схемы намагничивания позволяет получить коэффициент корреляции 0,974 при среднеквадратичном отклонении 40 °С.

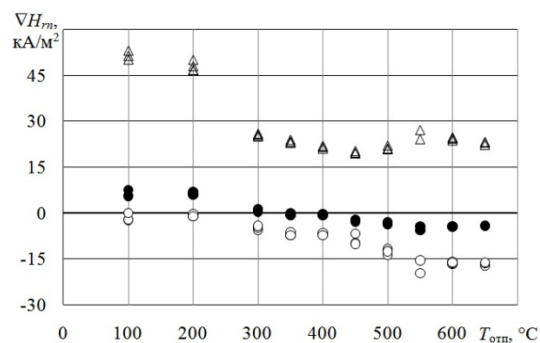


Рисунок 1 – Зависимость от температуры отпуска величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания парой импульсов амплитудой 250 кА/м ( $\Delta$ ) и перемагничивания импульсами амплитудой 100 кА/м ( $\circ$ ) и 25 кА/м ( $\bullet$ )

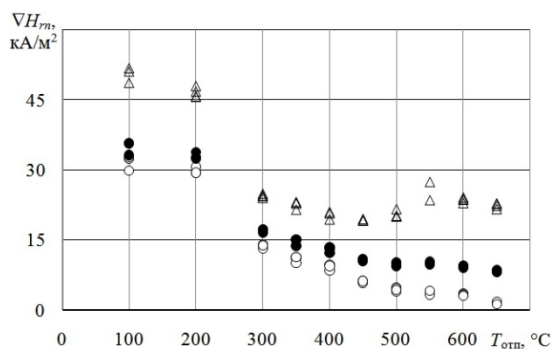


Рисунок 2 – Зависимость от температуры отпуска величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания парой импульсов амплитудой 250 кА/м ( $\Delta$ ) и перемагничивания импульсами амплитудой 40 кА/м ( $\circ$ ) и 20 кА/м ( $\bullet$ )

Также была рассмотрена схема намагничивания образцов стали 40X, отпущенных при разной температуре, когда первая из задаваемых ампли-

туд выбиралась из условия близости к нулю величины градиента напряженности поля остаточной намагниченности на образце, отпущенном при максимальной температуре, а вторая была вдвое меньшей, то есть составляли 40 кА/м и 20 кА/м соответственно. Зависимость измеренных градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска стали 40X представлена на рисунке 2.

Многопараметровая модель оценки качества термообработки стали 40X, построенная с использованием величин градиентов напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания парой импульсов противоположного направления амплитудой 250 кА/м, а затем перемагничивания импульсами магнитного поля с амплитудой 40 кА/м и 20 кА/м, дает коэффициент корреляции между измеренными и расчетными значениями температур, равный 0,983, и среднеквадратичное отклонение 32 °С.

По результатам исследования можно сделать вывод о возможности построения достаточно точной многопараметровой модели оценки качества термообработки стали 40X по трем градиентам напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных на приборе ИМА-6 после пары импульсов максимальной амплитуды противоположного направления, после перемагничивающего импульса, величина амплитуды которого выбрана на образце, отпущенном при максимальной температуре, и после намагничивания импульсом с амплитудой, вдвое меньшей предыдущей.

### Литература

1. Мельгуй, М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. II. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 11–20.
2. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, А.А. Осипов, Д.А. Пинчуков // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.
3. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали после его окончания: пат. 11395 Респ. Беларусь, МПК G 01N 27/80 / В.Ф. Матюк, В.Б. Кратиров, В.А. Бурак; заявитель Ин-т прикладной физики НАН Беларуси – № а20061277; заявл. 14.12.2006; опубл. 30.12.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 6. – С. 137–138.
4. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали: пат. 12477 Респ. Беларусь, МПК G 01N 27/72 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак,

М.Н. Делендик; заявитель Ин-т прикладной физики НАН Беларуси. – № а20080198; заявл. 21.02.2008; опубл. 30.10.2009 // Афіцыйны

бул. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 123.

УДК 66.088

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КРЕМНИЕВЫМИ ПЛАСТИНАМИ НА СКОРОСТЬ СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК

Бельский Д.В., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Тихон О.И., Лушакова М.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

СВЧ газоразрядное оборудование технологического назначения широко используется на операциях неprecизионной обработки материалов микроэлектроники, предусматривающих индивидуальную обработку полупроводниковых пластин диаметром 300 и 200 мм и групповую обработку пластин с меньшим диаметром. Анализ литературных источников показывает, что в конструкциях таких СВЧ плазмотронов в качестве систем для возбуждения и поддержания СВЧ разряда используются резонаторы прямоугольной формы. В резонаторных СВЧ плазмотронах для получения разряда используется энергия «стоячих волн» [1]. Полученные результаты измерений структуры распределения СВЧ поля в зоне газового разряда в резонаторе прямоугольной формы указывают на существование устойчивой формы неравномерности распределения плотности мощности в объеме разрядной зоны [2]. Это свидетельствует о наличии существенной пространственной неоднородности в параметрах СВЧ разряда применительно к цилиндрическим разрядным камерам туннельного типа, что в свою очередь предполагает разброс скоростей гомогенных и гетерогенных процессов по сечению и длине разрядной камеры.

Для эффективного проведения плазменных процессов обрабатываемые материалы необходимо размещать в областях СВЧ разряда, где его химическая активность максимальна [1]. При групповой обработке полупроводниковых пластин одним из факторов, влияющих на скорость удаления фоторезиста, является расстояния между подложками, что может быть связано с изменением плотности травящих фоторезист частиц, ухудшением отвода отработанных продуктов реакции, увеличением сопротивления движению газового потока.

Экспериментальные исследования влияния расстояния между подложками на скорость удаления с их поверхности фоторезиста в области локального максимума и минимума СВЧ энергии проводились на базе лабораторной СВЧ плазменной установки резонаторного типа [3], используемой на операциях очистки полупроводниковых подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазменного

осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы [1].

Внутри кварцевого туннельного реактора объемом около 9000 см<sup>3</sup> на подложкодержателе из кварцевого стекла размещались пластины из монокристаллического кремния диаметром 100 мм с нанесенным на его поверхность фоторезистом марки *S 1813 G 2 SP 15* толщиной 1,5 мкм. Пластины располагались вдоль оси напуска газа. Регистрация момента окончания процесса удаления фоторезиста проводилась при помощи спектрометра *SL 40-2-2048 ISA* по интенсивности спектральной линии кислорода  $\lambda = 777,46$  нм. В качестве рабочего газа использовался воздух. Процесс плазмохимического удаления проводился при давлении 130 Па.

Результаты исследования влияния расстояния между обрабатываемыми кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления с их поверхности фоторезистивных пленок представлены на рисунке 1.

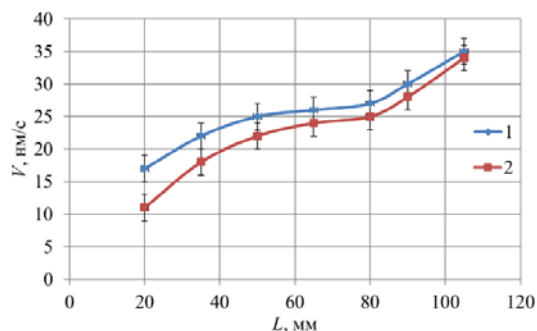


Рисунок 1 – Зависимость скорости СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин от расстояния между ними:

1 – в области локального максимума СВЧ мощности;  
2 – в области локального минимума СВЧ мощности

Исследование процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных покрытий с полупроводниковых пластин при расположении в характерных местах максимумов и минимумов СВЧ мощности в плазменном объеме при вращающемся диссекторе показало, что в случае обработки одиночных пластин или партий пластин с расстоянием между ними соизме-

римым с их диаметром присутствие локальных областей не оказывает существенного влияния на скорость удаления материала.

Экспериментально установлено, что при групповой обработке полупроводниковых пластин уменьшение расстояния между кремниевыми пластинами приводит к снижению скорости плазмохимического удаления фоторезистивных маскирующих покрытий с их поверхности. Уменьшение расстояния между обрабатываемыми пластинами в характерных местах максимумов СВЧ мощности в плазменном объеме может приводить к уменьшению скорости удаления фоторезиста до двух раз, в локальных местах минимумов – до трех раз.

При расстоянии менее 50 – 60 мм между пластинами происходит значительное снижение скорости удаления фоторезиста, что может быть частично объяснено экранированием пластинами диаметром 100 мм области обработки, эффектом поглощения СВЧ энергии кремниевыми пластинами, обладающими высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь, а также повышенной гибелью активных частиц на поверхности подложек.

УДК 621.7.09

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Биткаша В.С.<sup>1</sup>, Юрасова К.В.<sup>1</sup>, Хомич Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Унитарное предприятие «Полимаг», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

### Введение

Технический прогресс отраслей промышленности и развитие науки требует непрерывного повышения точности форм и поверхностей деталей машин и приборов. Сегодня наиболее требовательны в этом отношении детали оптики и лазерной техники.

Поверхности оптических деталей представляют собой части сферы у линз и сферических зеркал или части плоскости у пластин, клиньев, призм и плоских зеркал. Такие поверхности могут иметь погрешности как по общей кривизне или плоскостности, так и по местным ошибкам. Допуски на эти погрешности задаются количеством интерференционных колец или полос, или их долей. Обычно на практике интерференционную картину принято называть «цветом».[1]

Форма рабочей поверхности оптической детали характеризуется точностью выполнения ее радиуса. Отклонение поверхностей оптических деталей от заданных радиусов и от правильной сферы проверяют пробным стеклом (эталоном), наложенным на нормируемую поверхность. Допуски на отклонения формы поверхности задают числом колец интерференции и обозначают символами  $N$  и  $\Delta N$ . [1]

Полученные результаты необходимо учитывать при разработке конструкций систем загрузки полупроводниковых пластин в разрядную камеру СВЧ плазматрона, а также при оптимизации технологических процессов групповой СВЧ плазмохимической обработки.

### Литература

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / Под ред. А.П. Достанко – Минск : Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Бордусов С.В. Особенности распределения СВЧ мощности в объеме резонаторной камеры СВЧ плазматрона / С.В. Бордусов, Ю.С. Шинкевич // Материалы XI МНТК «Современные средства связи» 25.09–29.09.2006 г., Нарочь, Республика Беларусь. – Минск : Бестпринт, 2006 – С. 36.
3. Бордусов, С.В. Конструктивные особенности установки и технологические процессы СВЧ-плазменной обработки материалов в условиях низкого вакуума / С.В. Бордусов // Материалы, технологии, инструменты. – 2001. – Т. 6, № 4. – С. 62–64.

Эти параметры характеризуют разность стрелок прогиба поверхности детали и эталона, выраженных числом интерференционных колец –  $N$ . Отступление радиуса контролируемой поверхности от заданного (эталоны) называют общей ошибкой формы поверхности. Величина  $N$  представляет собой нерегулярность формы в разных зонах. Её называют местной ошибкой формы поверхности. Допуск на местные ошибки более жесткий, т.к. они сильнее влияют на качество изображения, создаваемого оптической системой. [1]

### Методика исследования

Партия образцов из оптического стекла  $\varnothing 40 \times 10$  мм выбрана из номенклатуры изделий ОАО «Пеленг» (г. Минск) для изучения возможностей процесса магнитно-абразивного полирования (МАП) в отношении повышения точности формы и снижения численных значений параметров  $N$  и  $\Delta N$ .

Сущность метода магнитно-абразивного полирования заключается в использовании в качестве инструмента ферроабразивного порошка в магнитном поле, под действием которого порошок формируется в своеобразную «эластичную» щётку. Абразивный компонент в составе частиц порошка



позволяет без добавления дополнительных абразивных сред осуществлять съём материала. [2]

Оценка точности формы по параметрам N и ΔN проводилась на лазерном интерферометре Zygo VeriFire AT™ (Германия).



Рисунок 1 – Лазерный интерферометр Zygo VeriFire

В данном контрольно-измерительном приборе сравнение каждого образца с плоской эталонной поверхностью осуществляется гелий-неоновым лазером с рабочей длиной волны 632,8 нм.

На рисунке 2 представлены интерферограммы поверхностей деталей № 1–4 до МАП, на которых по цветовой шкале от красного до синего цвета расположены значения высот нанорельефа от наибольших выступов до впадин соответственно. Под каждой интерферограммой указаны параметры ошибки формы N и ΔN для данного образца. Единица измерения – длина волны (fr). В таблице 1 эти параметры указаны в нм.

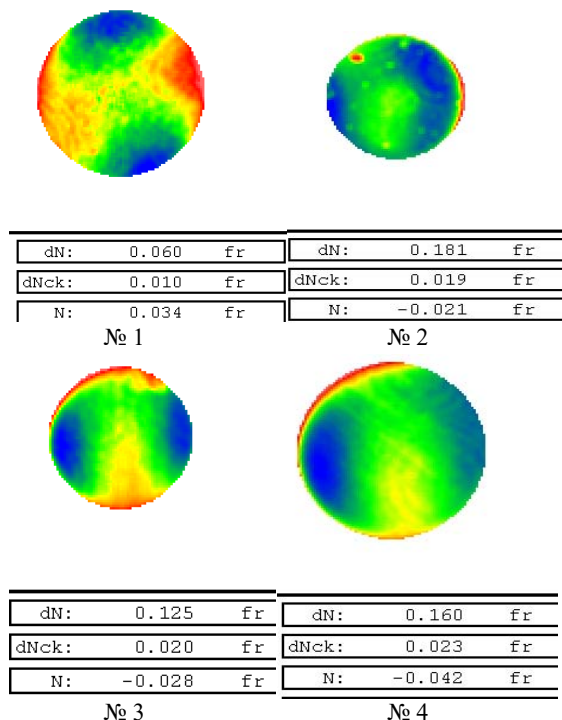


Рисунок 2 – Результаты измерений формы поверхности образцов до МАП

Таблица 1 – Характеристики формы поверхности образца до МАП

| № детали | Параметры формы |       |
|----------|-----------------|-------|
|          | ΔN ,нм          | N ,нм |
| 1        | 18,9            | 10,7  |
| 2        | 57,1            | 6,6   |
| 3        | 39,4            | 8,8   |
| 4        | 50,5            | 13,2  |

Операция МАП каждого образца занимает 10 минут. После чего образцы подвергаются глубокой очистке и снова проходят операцию измерения параметров точности формы.

На рисунке 3 представлены интерферограммы поверхностей деталей № 1–4 после МАП.

В таблице 2 указаны характеристики точности поверхности образца после МАП.

Таблица 2 – Характеристики формы поверхности образца после МАП

| № детали | Параметры формы |       |
|----------|-----------------|-------|
|          | ΔN ,нм          | N ,нм |
| 1        | 13,2            | 8,8   |
| 2        | 46,6            | 2,5   |
| 3        | 22,7            | 4,1   |
| 4        | 43,2            | 5,3   |

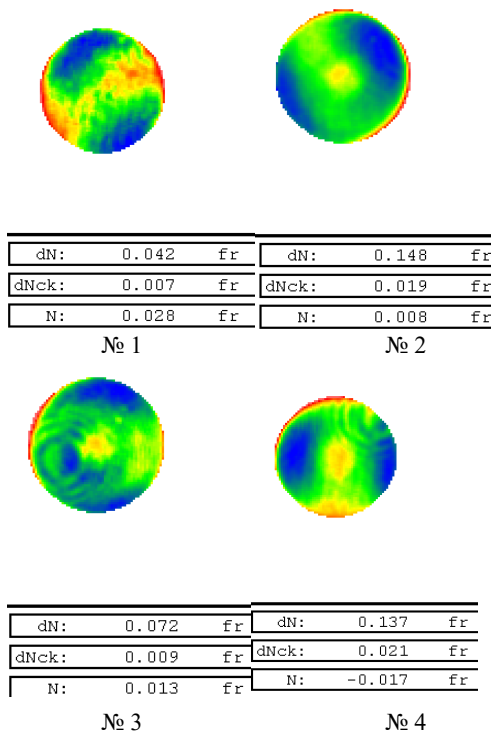


Рисунок 3 – Результаты измерений формы поверхности образцов после МАП

**Заключение**

В результате магнитно-абразивного полирования достигнуто снижение параметров точности формы поверхности оптических деталей в среднем на 10–50 %. в предельно малом диапазоне величин: менее 50 нм по местной ошибке формы и менее 10 нм – по общей.

**Литература**

1. Зубаков, В.Г., Семибратов, Н.Н., Штандель, С.К. Технология оптических деталей. – М. :Машиностроение, 1985. – 368 с.

2. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 217 с. : ил.

УДК 621.9.048

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛЫВОВ МЕТАЛЛА НА ШТРИПСЕ НА ПРОЦЕСС МИКРОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

**Киселев М.Г., Богдан П.С., Ничипорук А.С.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Цель данной работы заключалась в теоретической оценке влияния геометрических параметров напльвов металла, полученных на исходной гладкой рабочей поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования, на процесс микрорезания материалов.

На рисунке 1 представлена фотография единичной лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы, с указанием ее основных геометрических параметров.

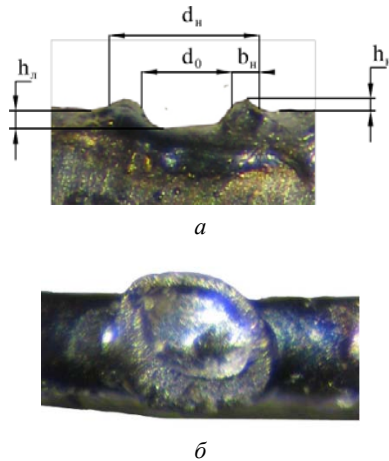


Рисунок 1 – Фотография единичной лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы: а – вид сбоку; б – вид сверху

На ней обозначены  $d_n$  – диаметр напльвов металла,  $h_n$  – их высота;  $d_0$  – диаметр лунки относительно исходного положения поверхности;  $b_n$  – ширина напльвов металла по краю лунки и  $h_l$  – ее глубина.

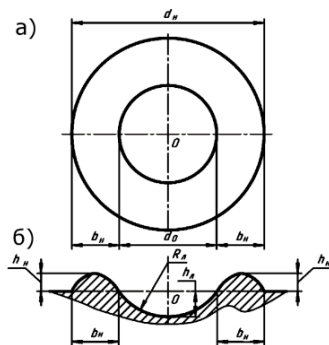


Рисунок 2 – Схематичное представление единичной лунки в плане (а) и ее диаметрального сечения (б)

Из приведенных фотографий видно, что реальная поверхность напльвов металла имеет развитый микрорельеф, состоящий из большого количества микровыступов и микровпадин. Вместе с тем, если их не учитывать, то расположение напльвов металла на поверхности штрипсы схематично можно представить следующим образом (рисунок 2).

Из приведенной схемы следует, что напльвы металла по краю лунки имеют в плане замкнутый контур в форме кольца внутренним диаметром  $d_0$ , наружным  $d_n$  и шириной  $b_n$ . При этом центр этих окружностей совпадает с центром лунки, т. е. напльвы металла расположены симметрично относительно ее центра (точка О).

В диаметральном сечении лунки ее геометрическими параметрами являются высота напльвов металла  $h_n$ , их ширина  $b_n$ , глубина лунки  $h_l$  и ее радиус  $R_l$ . Для более детального анализа геометрических параметров напльвов металла обратимся к схеме, приведенной на рисунке 3, где показан диаметральный разрез только напльвов металла и форма образуемой ими поверхности по краю лунки.

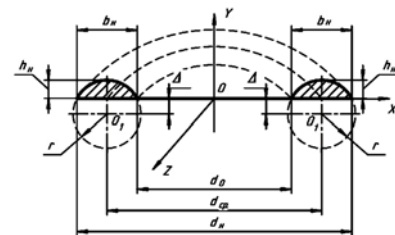


Рисунок 3 – Схематичное представление диаметрального сечения напльвов металла и форма образуемой ими поверхности по краю лунки

Как видно, кривую, описывающую профиль напльвов металла в диаметральном сечении, можно представить в виде части (дуги) окружности радиусом  $r$  с центром в точке  $O_1$  (воображаемая часть этой окружности показана на рисунке 3 пунктирной линией). При этом центр этой окружности (точка  $O_1$ ) расположен внутри материала штрипсы на расстоянии  $\Delta$  от положения ее исходной поверхности.

Следовательно, образуемая по краю лунки поверхность представляет собой поверхность вращения, полученную вращением дуги окружности радиусом  $r$  вокруг оси  $OY$ , лежащей в плоскости

этой окружности и не пересекающей ее. Такая поверхность представляет собой открытый тор, срезанный по плоскости XOZ, совпадающей с исходной поверхностью штрипсы. С учетом этого, форму диаметрального сечения напылов металла можно представить в виде сегмента круга высотой  $h_n$  и хордой (основанием сегмента)  $b_n$ .

С повышением энергии  $E$  электрического разряда [1] высота напылов металла  $h_n$  по краю лунки и их ширина  $b_n$  увеличиваются, но при этом возрастание  $b_n$  происходит более интенсивно, чем  $h_n$ . Это приводит к изменению формы сегмента, как показано на рисунке 4.

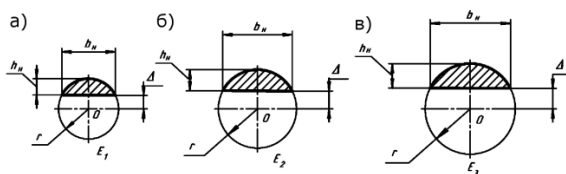


Рисунок 4 – Схематическое представление изменения формы кругового сегмента в диаметральном сечении напыла металла в зависимости от энергии разряда:

а – при  $E_1$ ; б – при  $E_2$ ; в – при  $E_3$  ( $E_1 < E_2 < E_3$ )

Как видно, с повышением  $E$  увеличивается радиус  $r$  окружности, а также величина отклонения основания сегмента от центра круга  $\Delta = r - h_n$ . При этом в силу опережающего возрастания величины основания сегмента  $b_n$  по сравнению с его высотой  $h_n$ , отношение  $h_n/b_n$  с повышением энергии разряда уменьшается, т. е. профиль напыла металла становится более пологим.

На основе отмеченных положений, ниже проанализируем геометрические параметры напылов металла с точки зрения формирования на них режущих элементов (кромки).

В процессе резания инструмент должен занимать определенное положение относительно станка и обрабатываемой заготовки. Непосредственно работу резания выполняет режущая часть под действием усилия, передаваемого от станка через присоединительную часть инструмента. Чтобы режущая часть смогла внедриться под отделяемый слой материала, она должна иметь форму клина. Этот клинообразный элемент режущей части инструмента называют режущим клином. Во всех случаях режущий клин имеет по меньшей мере две рабочие поверхности: переднюю и заднюю. По передней поверхности сходит отделяемая в процессе резания стружка, а задняя поверхность обращена в сторону обработанной поверхности заготовки. Тогда в нашем случае (рисунок 5) наружная поверхность напыла металла по краю лунки представляет собой переднюю поверхность режущего клина, а выступающая часть напыла – его заднюю поверхность.

Пересечение передней и задней поверхностей образуют край клина, называемый режущей кромкой или режущим лезвием. В данном случае

этим лезвием является скругленная по радиусу замкнутая поверхность выступающей части напыла металла. С учетом этого, на схеме (рисунок 5) обозначены следующие геометрические параметры напыла металла, влияющие на его режущую способность:  $\gamma$  – передний угол;  $\alpha$  – задний угол;  $r$  – радиус скругления режущей кромки;  $h_n$  – ее высота (высота зуба).

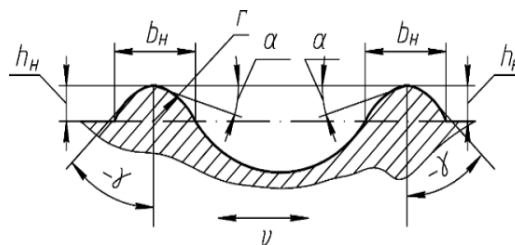


Рисунок 5 – Схема диаметрального сечения лунки на поверхности штрипсы с указанием геометрических параметров, влияющих на ее режущую способность

Как и при микрорезании единичным абразивным зерном режущий клин напылов металла характеризуется отрицательным передним углом  $\gamma$ , значение которого является одним из определяющих факторов формы срезаемой стружки. Так, при резании с малым передним углом материал заготовки легко удаляется с образованием сливной стружки. С увеличением  $\gamma$  стружка отделяется кусочками, т. е. образуется элементная стружка, а при резании с большим передним углом образуется стружка надлома. В нашем случае величины  $\gamma$  и  $r$  определяются отношением  $b_n/h_n$ , т. е. отношением основания сегмента круга к его высоте, с увеличением которого значения указанных параметров возрастают.

В плане режущая кромка напылов металла представляет собой дугу окружности радиусом  $R = d_{cp}/2$ , а главный угол в плане зависит от глубины резания, с увеличением которой его значение возрастает, что приводит к увеличению ширины срезаемого слоя материала, а также усилению степени его деформирования.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что геометрические параметры напылов металла по краю лунки оправданно оценивать как малоразмерные режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материал, уступающий по твердости металлу напылов.

## Литература

1. Влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры единичной лунки и микротвердость ее поверхностного слоя / М.Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 2. – С. 53–58.

УДК 621.9.048

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЫВОВ МЕТАЛЛА НА ШТРИПСЕ НА ПРОЦЕСС МИКРОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Киселев М.Г., Богдан П.С., Сидоров К.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Цель данной работы заключалась в экспериментальной оценке влияния геометрических параметров напылов металла, полученных на исходной гладкой рабочей поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования, на процесс микрорезания материалов.

На рисунке 1 представлены фотографии сквозных и тупиковых микроцарапин, полученных на поверхности образца в результате взаимодействия с напыльями металла на штрипсе.

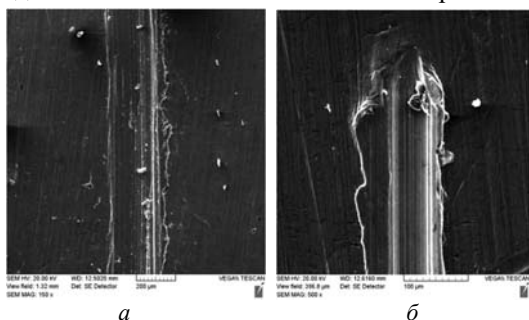


Рисунок 1 – Фотография сквозной (а) и тупиковой (б) микроцарапин на поверхности алюминиевого образца, полученных в результате ее взаимодействия с напыльями металла на штрипсе

Приведенные фотографии свидетельствуют о том, что напыльи металла на поверхности штрипсы представляют собой малоразмерные режуще-деформирующие элементы, осуществляющие микроцарапание материала образца. По сравнению с микрорезанием единичным абразивным зерном микроцарапание напыльями металла имеет ряд специфических особенностей, обусловленных их формой и размерами. Так, единичное абразивное зерно имеет одну вершину с отрицательным передним углом, которая внедряясь в материал осуществляет его микрорезание. Режущая кромка напылов металла расположена по краю лунки по замкнутой кривой, близкой по форме к окружности. При этом высота напылов металла относительно исходной поверхности штрипсы в пределах этой окружности является переменной, что схематически иллюстрируется разверткой профиля сечения режущей кромки напыля, представленной на рисунке 2.

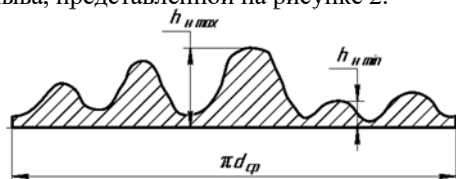


Рисунок 2 – Схематическое представление развертки профиля сечения режущей кромки напыля металла по краю лунки

Как видно, в пределах окружности диаметра  $d_{шр}$  высота напылов металла изменяется от максимального  $h_{нmax}$  до минимального  $h_{нmin}$  значений. Таким образом, режущая кромка напылов металла представляет собой совокупность отдельных режуще-деформирующих микроэлементов, участие которых в процессе микроцарапания зависит от их геометрических параметров и расположения по окружности режущей кромки напыля металла.

В силу указанных обстоятельств в процессе микроцарапания возможны самые различные условия взаимодействия напылов металла с обрабатываемыми материалами, определяющие форму и размеры получаемых на его поверхности микроцарапин. Так, если режущие кромки напылов металла имеют сравнительно одинаковую высоту, то получаемые как сквозные (рисунок 1а), так и тупиковые (рисунок 1б) микроцарапины имеют постоянную ширину с образованием по краям заусенцев металла. В этом случае профиль сечения микроцарапины (рисунок 3) имеет форму, аналогичную как при микрорезании единичным абразивным зерном.

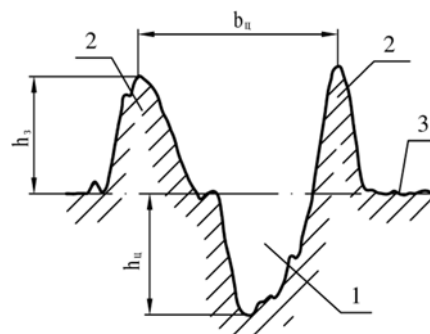


Рисунок 3 – Форма поперечного сечения микроцарапины, полученной при микроцарапании поверхности образца напыльем металла с одинаковой высотой режущих кромок

На рисунке 3 обозначены:  $h_{ц}$  – глубина царапины,  $h_{з}$  – высота заусенцев по ее краю,  $b_{з}$  – ширина этих заусенцев.

Если режущие кромки напылов металла существенно отличаются по высоте, то в формировании микроцарапины участвуют те из них, которые на данный момент имеют наибольшую высоту. Причем эти элементы могут быть расположены как на передней части напыля металла (т. е. по ходу относительно подачи), так и на его противоположной стороне, что наглядно иллюстрируется фотографией тупиковой царапины, приведенной на рисунке 4.

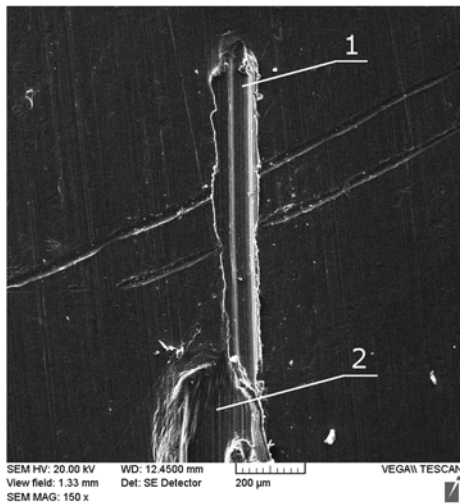


Рисунок 4 – Фотография тупиковой микроцарапины на поверхности образца, состоящей из опережающей 1 и отстающей 2 частей

Как видно, опережающий след царапины формируется за счет микровыступа на передней части этого напыла, а отстающий след – за счет микровыступа, расположенного на его противоположной стороне. Поэтому получаемый профиль сечения следа состоит из двух микроцарапин (рисунок 5), формируемых соответствующими микровыступами на поверхности напылов металла.

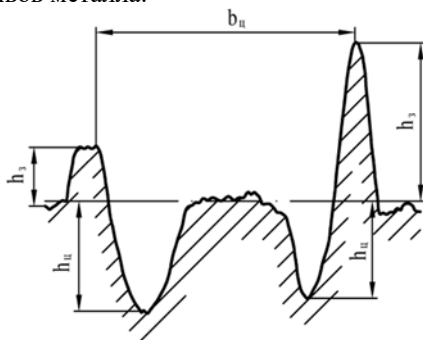


Рисунок 5 – Формы поперечного сечения микроцарапины, полученной при микроцарапании поверхности образца напылами металла с различной высотой режущих кромок

Экспериментальные данные, отражающие влияние напряжения накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) на диаметр напылов металла  $d_n$  на поверхности штрипсы и их высоту  $h_n$ , а также на параметры микроцарапины, полученной на поверхности алюминиевого образца при взаимодействии со штрипсой, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения исследуемых параметров на поверхности штрипсы и параметров микроцарапины на поверхности алюминиевого образца, соответствующие различным напряжениям накопительного конденсатора в процессе модифицирования поверхности штрипсы

| Названия исследуемых параметров на поверхности штрипсы и параметров микроцарапины на поверхности алюминиевого образца | Значения исследуемых параметров (в мкм) при различном значении напряжения $U$ накопительного конденсатора в процессе модифицирования поверхности штрипсы |                    |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
|                                                                                                                       | $U = 36 \text{ В}$                                                                                                                                       | $U = 42 \text{ В}$ | $U = 75 \text{ В}$ |
| Диаметр напылов металла $d_n$ на поверхности штрипсы                                                                  | 105                                                                                                                                                      | 220                | 340                |
| Высота напылов металла $h_n$ на поверхности штрипсы                                                                   | 20                                                                                                                                                       | 38                 | 44                 |
| Глубина микроцарапины на образце, $h_u$                                                                               | 12                                                                                                                                                       | 17                 | 24                 |
| Ширина микроцарапины на образце, $b_u$                                                                                | 85                                                                                                                                                       | 210                | 300                |
| Высота заусенцев по краю микроцарапины, $h_3$                                                                         | 10                                                                                                                                                       | 16                 | 18                 |

Из анализа приведенных данных следует, что с увеличением геометрических параметров единичной лунки на поверхности штрипсы за счет повышения напряжения  $U$  накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) возрастают параметры получаемой на поверхности образца микроцарапины. Так, с повышением  $U$  с 36 до 75 В диаметр напылов металла по краю лунки увеличился со 105 до 300 мкм и их высота – с 20 до 44 мкм, при этом глубина микроцарапины на образце возросла с 12 до 24 мкм, ее ширина – со 105 до 300 мкм и высота заусенцев по краю микроцарапины – с 10 до 18 мкм.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что образовавшиеся в результате электрической эрозии напылы металла по краю единичной лунки представляют собой своеобразные малоразмерные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять разрушение материала, уступающего по твердости металлу напылов, путем его микрорезания.

УДК 533.9.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА В $N_2$ В ТРУБЧАТОМ ЭЛЕКТРОДЕ

Божко А.И., Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Лушакова М.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Применительно к задачам интенсификации процессов вакуумно-плазменной обработки материалов интерес представляет изучение и разработка метода предварительной активации рабочего газа в стороннем плазменном источнике [1-2] в качестве которого может использоваться разряд с полым катодом.

Исследования влияния некоторых конструктивных особенностей газоразрядной системы на возбуждение разряда с эффектом полого катода проводились с использованием цилиндрического электрода-катода трубчатой формы держателем которого являлась кварцевая трубка (рисунок 1).

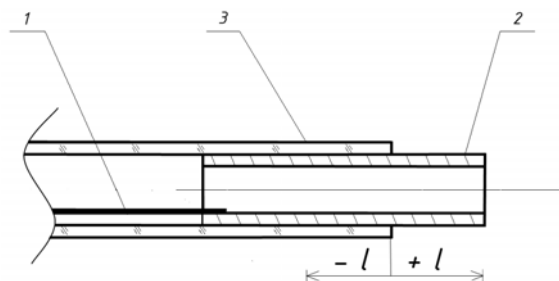


Рисунок 1 – Конструкция плазменной разрядной системы: 1 – проволока-токоподвод; 2 – трубчатый полый катод; 3 – трубка кварцевая

Полый катод 2 выполнен в виде цилиндра с внутренним диаметром 5 мм из коррозионностойкой стали, который помещен в один из концов длинной кварцевой трубки 3. Этот конец находится непосредственной в вакуумной камере. Кварцевая трубка выполняет одновременно несколько функций: является держателем электрода-катода; обеспечивает подачу плазмообразующего газа через электрод; служит защитным экраном для металлического токоподвода; является изолятором для части наружной поверхности электрода.

При проведении ряда экспериментов использовался заземлённый противозлектрод (анод). Диск размещался перпендикулярно оси электрода-катода на разном расстоянии от него.

Для возбуждения разряда с ЭПК на катод подавалось импульсное напряжение отрицательной полярности с частотой следования импульсов прямоугольной формы  $f = 50$  кГц и скважностью импульсов  $S = 4$ .

В качестве плазмообразующего газа использовался азот ( $N_2$ ) высокой степени очистки. При проведении экспериментов диапазоны регулирования режимов процесса плазмообразования составляли: амплитуда импульсов напряжения генератора изменялась от -450 В до -1300 В; дав-

ление  $N_2$  в вакуумной камере установки варьировалось в интервале 50-700 Па.

Экспериментальные данные по амплитудным значениям напряжения возбуждения разряда при различных положениях катода относительно торца кварцевой трубки для разных величин давления представлены на рисунке 2.

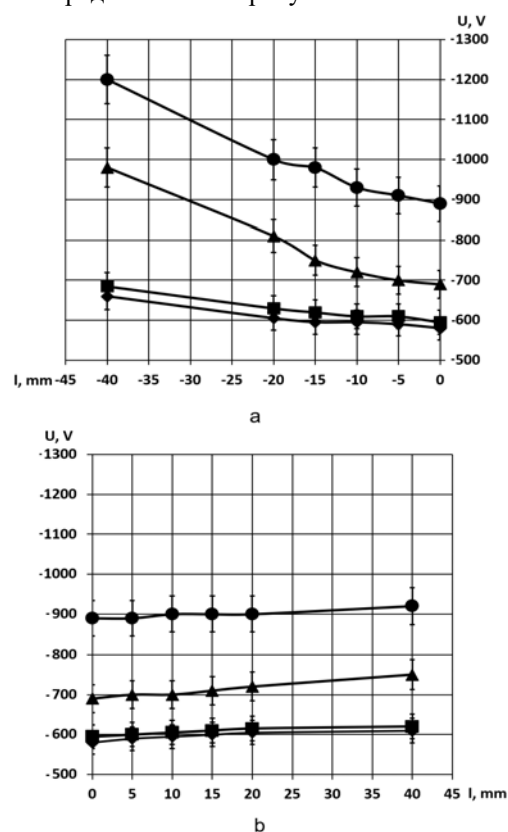


Рисунок 2 – Зависимости величин напряжения возбуждения разряда от положения катода в кварцевой трубке при разных величинах давления (газ –  $N_2$ ) при углублении в кварцевый чехол (а), выдвигании из кварцевого чехла (б)

Из приведённых зависимостей видно, что в пределах исследованных величин выдвигание электрода из кварцевой диэлектрической трубки существенного влияния на значения амплитуды импульсов напряжения возбуждения разряда с ЭПК не оказывает.

При углублении электрода в кварцевую трубку наблюдалась близкая к линейной зависимость повышения величины напряжения пробоя от расстояния до торца трубки. При этом по мере повышения давления  $N_2$  степень такого влияния увеличивается. По нашему мнению, этот эффект может быть связан с увеличением вероятности

гибели плазменных частиц на внутренней поверхности кварцевой диэлектрической трубки и, соответственно, ухудшением условий плазмообразования.

В процессе проведения экспериментов установлено, что положение полого катода трубчатого типа в кварцевой трубке влияет на диапазон давлений, при котором возбуждается и стабильно горит разряд с ЭПК.

Разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 47–665 Па при положениях торца катода относительно края кварцевой трубки от  $l = +40$  мм до  $l = -15$  мм. При углублении катода более чем на 15 мм диапазон давлений существенно уменьшается, особенно его верхняя граница. Разряд начинает вести себя нестабильно или вовсе не загорается при давлениях свыше 350 Па.

Следует отметить, что нестабильность в данном случае проявлялась в быстром (порядка 2–5 с) затухании разряда и невозможности объективной регистрации его характеристик по осциллограмме.

Как показали результаты проведённых экспериментов, способ подачи газа в зону плазмообразования оказывает влияние на характеристики возбуждения и поддержания разряда с ЭПК.

На рисунке 3 приведены зависимости величин пикового напряжения, возбуждающего разряд с ЭПК в трубчатом электроде, от давления плазмообразующей среды при различных положениях катода в кварцевой трубке. Данные рисунка 3а получены для условий подачи газа в объем вакуумной камеры не через разрядную систему. Данные рисунка 3б получены при пропуске газа по кварцевой трубке через разряд в полом электроде-катоде.

Из представленных данных видно, что разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 50–660 Па при пропуске плазмообразующего газа через разрядную систему, а при подаче газа минуя разрядную систему – в более узком диапазоне 100–500 Па.

При этом видно, что в случае подачи газа через разрядную систему для возбуждения разряда с ЭПК требуются несколько большие значения импульсного напряжения. По нашему мнению, это может быть объяснено следующими факторами: при подаче плазмообразующего газа через электрод разрядной системы давление в его полости оказывается выше, чем в объёме вакуумной камеры; разряд формируется в потоке не активированного газа и на процессы плазмообразования область послесвечения плазмы существенного влияния не оказывает.

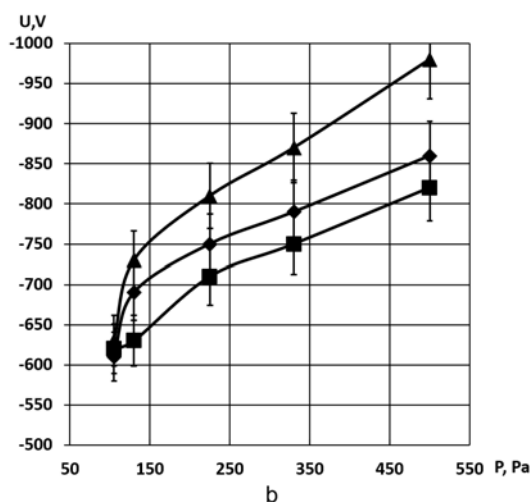
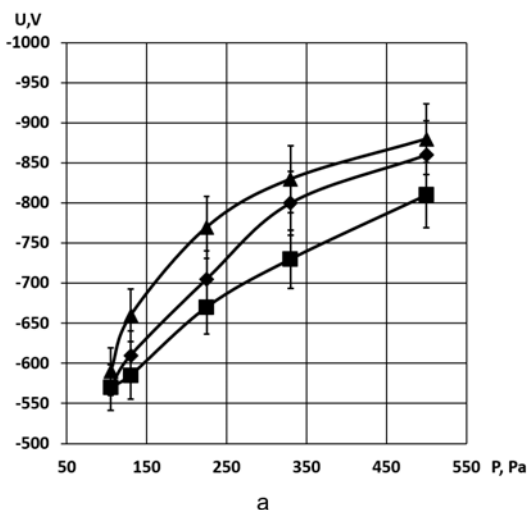


Рисунок 3 – Значения пикового напряжения возбуждения разряда с ЭПК в  $N_2$  при подаче газа минуя разрядную систему (а), через разрядную систему (б)

Применительно к возможным вариантам конструкции и расположения элементов разрядной системы изучалось влияние расстояния между полым катодом и заземлённым противоэлектродом на величину напряжения возбуждения разряда с ЭПК.

#### Литература

1. Райзер, Ю.П. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Применение / Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. – М. : Наука, 1995. – 320 с.
2. The influence of microwave  $CF_4$  plasma activation on the characteristics of reactive ion etching of mono-Si / S. Bordusau, S. Madveika, M. Lushakova, N. Kovalchuk // Plasma Physics and Technology – 2017. – V 4, № 1. – P. 13–15.

УДК 621.382.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В СУБМИКРОННОМ КРЕМНИЕВОМ ДИОДЕ С p-n ПЕРЕХОДОМ

Борздов А.В., Борздов В.М., Кучинский П.В.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Для изучения влияния шумов на работу полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники необходимо детальное исследование процессов переноса носителей заряда в них. В частности, для интегральных диодов и транзисторов интерес представляет исследование временных флуктуаций таких величин, как плотности протекающего в канале тока, напряженности электрического поля в структуре, плотности заряда свободных электронов и дырок, и т. д. Численное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло в данном случае является одним из наиболее эффективных методов расчета этих величин, поскольку позволяет детально учесть особенности процессов переноса носителей заряда с учетом реальной зонной структуры полупроводника, а также включать различные процессы рассеяния, в частности, ударную ионизацию [1–4].

Целью данной работы явилось моделирование токовых флуктуаций кремниевого диода со структурой  $n^+p$  в случае, когда между электродами поддерживается постоянное напряжение.

Моделируемый диод имеет структуру, аналогичную рассмотренной в [2]. Основные параметры диода следующие: длина  $n^+$ -области составляет 0,3 мкм, длина  $p$ -области – 0,4 мкм. Уровни легирования  $n^+$ - и  $p$ -областей равны  $10^{23} \text{ м}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , соответственно. Температура моделирования – 300 К. Рассматривается работа диода в режиме прямого смещения между электродами.

Полагается, что поперечные размеры диода намного больше расстояния между электродами. В этом случае учитывается изменение электрического поля и электростатического потенциала только вдоль канала диода и применяется одномерное самосогласованное моделирование, включающее решение одномерного уравнения Пуассона. Контакты электродов с полупроводником полагаются идеальными омическими. В данном случае при моделировании переноса частицы, достигающие контакта металл-полупроводник со стороны полупроводника, свободно покидают область моделирования. Металлический контакт при этом постоянно инжектирует определенное число носителей заряда в приконтактную область полупроводника, необходимое для поддержания квазинейтрального состояния в этой области. Квазиимпульсы инжектируемых частиц имеют максвелловское распределение.

Перенос электронов и дырок рассматривается в рамках аналитического закона дисперсии с учетом эффекта непараболичности в зоне про-

водимости и валентной зоне, соответственно [5]. Принимается во внимание внутримолекулярное и междолинное рассеяние электронов на фононах, рассеяние на ионизированной примеси и межзонная ударная ионизация. Для дырок учитываются процессы рассеяния на акустических и оптических фононах, рассеяние на ионизированной примеси и ударная ионизация. В отличие от [2], в настоящей работе учтены процессы ударной ионизации электронами и дырками. Соответственно, рассмотрены значения напряжений между электродами, большие 1 В, при которых вероятность этого процесса возрастает.

При использовании многочастичного метода Монте-Карло реальный ансамбль электронов и дырок заменяется меньшим ансамблем частиц с некоторым эффективным зарядом, большим элементарного (так называемый метод частиц) [6]. В рамках метода частиц рассчитывается объемная плотность заряда, входящая в уравнение Пуассона.

В рассматриваемом режиме работы диода величина плотности тока проводимости  $I(t)$  определяется из следующего выражения, полученного на основании теоремы Рамо-Шокли [2–4]:

$$I(t) = \frac{Q_e}{L} \sum_{i=1}^{N_e(t)} v_i(t) - \frac{Q_h}{L} \sum_{j=1}^{N_h(t)} v_j(t), \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между электродами,  $N_e(t)$  и  $N_h(t)$  – число электронных и дырочных частиц, находящихся в области моделирования в момент времени  $t$ ,  $v_i$  и  $v_j$  – мгновенные скорости  $i$ -й электронной и  $j$ -й дырочной частиц в момент времени  $t$ ,  $Q_e$  и  $Q_h$  – удельные заряды электронных и дырочных частиц (с размерностью Кл/м<sup>2</sup>). Мы полагаем  $Q_e = Q_h$ .

Автокорреляционные функции токовых флуктуаций определяются следующим образом [1–4]:

$$f(t) = \langle \delta I(0) \delta I(t) \rangle, \quad (2)$$

где  $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$  – флуктуации суммарной плотности тока. Усреднение в (2) проводится по времени.

Спектральная плотность токовых флуктуаций  $S$  в диоде определяется на основании рассчитанных автокорреляционных функций (2) с помощью следующего выражения [1–4]:

$$S(f) = 4 \int_0^{\infty} C(t) \cos(2\pi ft) dt. \quad (3)$$

На рисунке 1 представлены рассчитанные автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диоде для нескольких значений



напряжения на электродах. Сплошная кривая соответствует напряжению 1 В, штриховая кривая – 2 В, пунктирная кривая – 3 В.

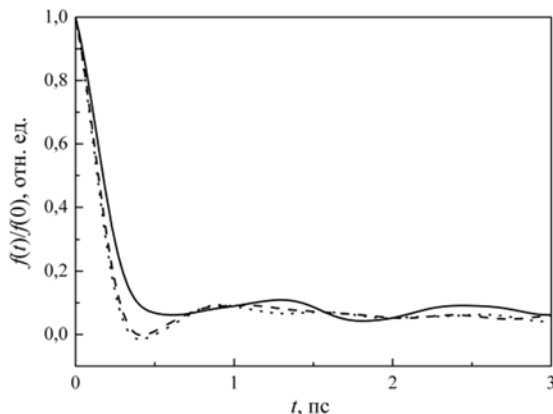


Рисунок 1 – Автокорреляционные функции токовых флуктуаций в диоде

На рисунке 2 представлены рассчитанные спектральные плотности флуктуаций плотности тока в диоде в зависимости от частоты  $F$  для этих же значений напряжения.

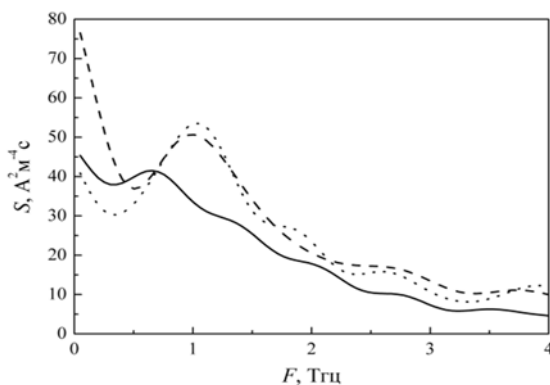


Рисунок 2 – Спектральные плотности токовых флуктуаций в диоде

Результаты расчетов автокорреляционных функций с учетом процесса ударной ионизации и их сравнение с результатами [2] показали, в частности, что с ростом напряжения между электродами наблюдается увеличение времени корреляции флуктуаций плотности тока. Зависимость спектральной плотности токовых флуктуаций от приложенного напряжения имеет более сложный характер. Как видно из рис. 2, с ростом напряжения от 1 до 2 В спектральная плотность в области низких частот ( $F < 0,5$  ТГц) вначале возрастает, а затем, с увеличением напряжения до 3 В, убывает.

Такое поведение спектральной плотности токовых флуктуаций отчасти связано с особенностями протекания процесса ударной ионизации в диоде. Для более точного исследования шумовых характеристик субмикронных диодов требуется более детальное исследование протекания процесса ударной ионизации в различных условиях. В частности, важным является установление влияния на шумовые характеристики прибора используемых моделей процессов ударной ионизации электронами и дырками при их реализации в многочастичном методе Монте-Карло. Представленные на сегодняшний день в литературе модели ударной ионизации дают не только существенно отличающиеся зависимости интенсивностей этого процесса, но и приводят к различным алгоритмам определения состояния конечных частиц в результате акта ударной ионизации. Последнее, в частности, влияет на кинетические характеристики носителей заряда, и в итоге может оказывать существенное влияние на шумовые характеристики прибора.

#### Литература

1. Zimmerman, J. Application of Monte Carlo techniques to hot carrier diffusion noise calculation in unipolar semiconducting components / J. Zimmerman, E. Constant // *Solid-State Electron.* – 1980. – Vol. 23. – P. 915–925.
2. Martin, M.J. Analysis of current fluctuations in silicon pn+ and p+n homojunctions / M.J. Martin, J.E. Velazques, D. Pardo // *J. Appl. Phys.* – 1996. – Vol. 79, No. 9. – P. 6975–6981.
3. Gonzalez, T. Ensemble Monte Carlo with Poisson solver for the study of current fluctuations in homogeneous GaAs structures / T. Gonzalez, D. Pardo // *J. Appl. Phys.* – 1993. – Vol. 73, No 11. – P. 7453–7464.
4. Reklaitis, A. Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 97. – P. 043709-1–043709-8.
5. Борздов, В.М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В.М. Борздов [и др.] // *Микроэлектроника.* – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 188–192.
6. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.

УДК 621.385.6

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Антончик Л.С.<sup>1</sup>, Дайняк И.В.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Подтверждение достоверности любого метода интроскопии обеспечивается сравнением полученных данных с результатами других методов. Таким образом, отталкиваясь от метрологически доказанной достоверности метода лазерной интерферометрии в области количественного определения интегральной составляющей остаточных механических напряжений в смонтированных п/п кристаллах и проведя сравнительный статистический анализ, была проведена процедура подтверждения достоверности лазерного фотоакустического метода в области тонких структур несплошности монтажного слоя конструкций «п/п кристалл-адгезив/припой-подложка» [1].

Возникновение остаточных внутренних напряжений, приводящих к объёмной деформации п/п кристаллов, искажающей профиль их планарной поверхности и регистрируемой на лазерных интерферограммах, обусловлено неоднородностями монтажного слоя, вызванными особенностями адгезионных свойств монтажных поверхностей «п/п кристалл-подложка», неравномерностью толщины адгезива, наличием пустот. Цифровая обработка интерферограммы позволяет построить матрицу деформации с последующим представлением профиля деформированного п/п кристалла в трехмерном пространстве.

С другой стороны, такую же матрицу деформации можно снять/получить непосредственно путём многоточечного измерения высоты планарной поверхности п/п кристалла контактным методом при помощи щупа преобразователя линейных перемещений (ПЛП), входящего в состав измерителя линейных перемещений (ИЛП). Таким образом, можно дополнить процедуру верификации разработанного метода лазерной фотоакустической (ЛФА) интроспекции, расширив диапазон методик измерений ещё одним инструментальным методом.

На рис. 1. приведена схема измерения профиля поверхности п/п кристалла смонтированного в металлокерамический корпус, которая состоит из: 1 – измеритель линейных перемещений НК-217; 2 – преобразователь линейных перемещений ПЛФ-10 Я2М3.468.157; 3 – трёхкоординатный микрометрический столик; 4 – штангенрейсмас ШР-250-0,05 ГОСТ 164-90; 5 – плита поверочная ТКП 630х400, кл. 0 ТУ 2-034-802-74; 6 – металлокерамический корпус со смонтированным п/п Si-кристаллом.

Измеритель линейных перемещений (ИЛП) (рис. 1, поз. 1) предназначен для измерения ли-

нейных размеров деталей, сборочных единиц, узлов СТО для производства изделий электронной техники и микроэлектроники. Номинальная цена единицы наименьшего разряда кода блока обработки квадратурных сигналов не более 0,0005 мм. Основная погрешность преобразователя линейных перемещений (ПЛП) (рис. 1, поз. 2) не более 0,002 мм.



Рисунок 1 – Схема измерения-профиля поверхности п/п кристалла смонтированного в металлокерамический корпус

Для эксперимента был выбран образец интегральной микросхемы (рис. 2) с большим сроком вылёживания (> 20 лет). По схеме, приведенной на рис. 1, щупом ПЛП (рис. 1, поз. 2) контактно был измерен профиль планарной плоскости п/п кристалла в 63-х точках с периодом 500 мкм задаваемым микрометрическим столиком (рис. 1, поз. 3). Матрица деформации п/п кристалла приведена в Таблице 1.

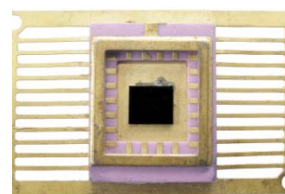


Рисунок 2 – Внешний вид металлокерамического корпуса со смонтированным п/п Si-кристаллом

Далее, на лазерном микроинтерферометре (рис. 3, а) была снята интерферограмма планарной поверхности исследуемого п/п кристалла (рис. 3, б).

Метод лазерной интерферометрии позволяет анализировать качество посадки кристаллов ИМС на подложки с применением эвтектики, мягких припоев, стекла, клеевых композиций и других материалов с качественной и интегрированной количественной оценками их напряжённо-деформированного состояния путём определения характера объёмной деформации смонтированных

п/п кристаллов по виду интерферограмм с учётом характера кривизны поверхности кристаллов (выпуклости и/или вогнутости).

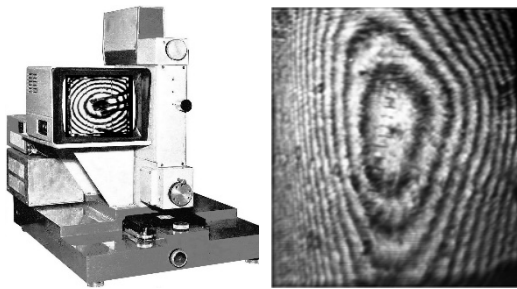


Рисунок 3 – Внешний вид лазерного микроинтерферометра (а) и интерферограмма исследуемого п/п кристалла (б)

При качественном соединении кристалла с подложкой интерферограмма имеет вид симметричных концентрично расположенных колец. Всякий дефект в зоне спая кристалла с подложкой приводит к образованию асимметричных интерференционных полос с увеличением плотности их распределения в зоне с повышенной деформацией. Сопоставив результаты анализа интерферограмм исходного (дооперационного) и напряжённо-деформированного (послеоперационного) состояний кристалла ИМС, можно оптимизировать режим выбранного технологического процесса и по достижении минимального уровня механических напряжений обеспечить качественную посадку кристаллов ИМС, что гарантирует воспроизводимость результатов монтажа межсоединений, стабильность параметров интегральных микросхем и их высокую эксплуатационную надёжность, а также позволяет в ходе проведения ускоренных циклов испытаний анализировать динамику изменения напряжённого состояния монтажной конструкции вследствие развития деградиционных процессов вплоть до появления параметрических и катастрофических отказов. Это в свою очередь, даёт возможность прогнозировать эксплуатационную надёжность исследуемых изделий электронной техники и микроэлектроники.

Цифровая обработка лазерной интерферограммы в 63-х точках позволила получить вторую матрицу деформации (таб. 2).

Таблица 1

|     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 590 | 600 | 730 | 840 | 900 | 925 | 940 |
| 475 | 545 | 590 | 745 | 810 | 780 | 845 |
| 380 | 500 | 515 | 685 | 760 | 740 | 795 |
| 245 | 385 | 420 | 590 | 670 | 630 | 685 |
| 205 | 350 | 375 | 575 | 615 | 590 | 635 |
| 90  | 225 | 275 | 485 | 500 | 500 | 540 |
| 40  | 180 | 200 | 410 | 420 | 425 | 475 |
| 30  | 65  | 95  | 315 | 340 | 355 | 375 |
| 0   | 20  | 40  | 275 | 240 | 240 | 300 |

Таблица 2

|     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 150 | 260 | 305 | 305 | 280 | 240 | 180 |
| 150 | 270 | 330 | 330 | 315 | 280 | 225 |
| 150 | 280 | 340 | 360 | 350 | 320 | 265 |
| 150 | 290 | 350 | 370 | 360 | 330 | 270 |
| 150 | 280 | 350 | 370 | 360 | 315 | 260 |
| 120 | 260 | 340 | 360 | 340 | 300 | 240 |
| 110 | 240 | 315 | 345 | 325 | 275 | 215 |
| 75  | 230 | 300 | 330 | 305 | 265 | 205 |
| 30  | 210 | 280 | 300 | 280 | 240 | 180 |

Сравнительный анализ двух пар последовательностей дискретных величин, полученных оцифровкой визуализированных результатов проведения исследования одного и того же объекта с помощью вышеупомянутых методов проводился на основе корреляционного анализа [1].

Рассмотрев матрицы Таб. 1, 2 как выборки для  $i = 1, 2, \dots, 63$ , коэффициент взаимной корреляции двух из них может быть рассчитан по формуле:

$$r_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{S_x S_y}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{xy}(k)$  – выборочная корреляционная функция;  $S_x, S_y$  – среднеквадратические отклонения выборок X и Y соответственно.

Выборочная корреляционная функция имеет для рассматриваемого в статье случая следующий вид:

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (X_i - M_x) \cdot (Y_{i+k} - M_y), \quad (2)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $M_x, M_y$  – математические ожидания для выборок X и Y соответственно.

Согласно результатам вычислений, выполненных по формулам (1)–(2) для пары дискретных распределений «интерферометрия-контактный метод» для значения  $k = 0$  получен коэффициент корреляции, равный  $r_{xy} = 0,4104$ .

### Выводы

В соответствии с результатами вычислений [1] были получены коэффициенты корреляции для пар дискретных распределений: «рентген-фотоакустика» – 0,2663; «фотоакустика-интерферометрия» – 0,6813, что говорит о большей достоверности, информативности и оперативности бесконтактных методов контроля фотоакустика и интерферометрия.

### Литература

1. Волкенштейн С.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. Сравнительная оценка альтернативных методов контроля качества и диагностики монтажных конструкций «п/п кристалл-подложка» / «Производство электроники», 2017. – № 5. – С. 118-120.

УДК 535.08; 681.7.08

## ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ УДА В КЭП РЕЖУЩИХ ДИСКОВ Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Босак В.И.<sup>1</sup>, Кузьмар И.И.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Разделение полупроводниковых пластин на кристаллы – одна из основных операций технологического процесса производства ИС, заключающаяся в выделении каждого отдельного кристалла из нескольких тысяч кристаллов ИС на монокристаллической пластине для последующего монтажа его в корпуса приборов. Оно осуществляется на специальных установках в ходе одностадийного процесса сквозного разрезания материала алмазными режущими дисками.

Для разделения пластин из «легких» материалов (кремний, арсенид галлия и т. п.) наиболее часто используются алмазные режущие диски (рис. 1), полученные методом гальваностегии. Сначала изготавливается алюминиевый корпус, на который методом электролитического осаждения наносится композиционное электрохимическое покрытие (КЭП), которое получают из суспензии, представляющей собой электролит с добавкой определенного количества высокодисперсного алмазного порошка (УДА). Данное КЭП является многофазной структурой, состоящей из непрерывной фазы (Ni матрицы), дисперсной фазы (УДА) и межфазной границы.

Частицы УДА, очищенные от примесей, характеризуются химической стабильностью, в то время как поверхность таких частиц весьма реакционноспособна и склонна к взаимодействию с разнообразными материалами и веществами. Отличительной особенностью УДА является то, что количество атомов углерода, формирующих кристаллический остов частицы, того же порядка, что и число поверхностных атомов углерода, которые обеспечивают активную периферию кластера. Благодаря этому обстоятельству УДА обладают уникальным сочетанием свойств кристалла алмаза со специфической структурой и активностью кластерных материалов. Частицы имеют сферическую или изометрическую формы без кристаллических граней с развитой структурой агрегатированных соединений.

На качество КЭП оказывают существенное влияние многочисленные факторы конструкторского, технологического и организационно-технического характера. К конструкторским факторам относятся: природа материала, размеры и форма покрываемой детали, электронное строение, структура и физико-механические свойства поверхности и их однородность, параметры микро- и макрошероховатости, природа материала покрытия, его физико-химические и механические константы, предполагаемая толщина слоя.

Самую многочисленную группу составляют факторы технологического характера управления свойствами тонких плёнок, которые можно разделить на три направления – подготовка поверхности подложки, модификация состава электролита и режима электролиза, активация процесса осаждения. Факторы первого направления могут в значительной степени изменить физико-химические и механические характеристики, электронное строение и структуру поверхности. Они создают определенные условия для начального этапа электрокристаллизации металла на инертной подложке, возникновения адгезионных сил между ними, построения кристаллической структуры тонкой пленки, которая определяется размерами кристаллов, их внешней формой (огранкой), характером расположения и взаимной ориентацией [1].

В настоящее время также не решён на должном уровне вопрос подготовки деталей в условиях массового производства при нанесении тонких плёнок на гальванических линиях. Причина заключается в том, что между операциями активации поверхности и осаждением металла устанавливается определённый период времени, связанный с транспортировкой деталей, промывкой в воде, стеканием электролита, в течении которого происходит контакт с кислородом воздуха и образуется оксидная плёнка. За 3÷5 минут на медной подложке толщина окисла достигает 11÷13 нм, на никелевой – 5÷9 нм. Образовавшаяся поверхностная фаза кристаллического или аморфного строения вносит существенное изменение в кинетику электродных реакций и не учитывается на практике. Эти процессы с трудом поддаются управлению, а качество обработки отличается высокой неравномерностью, растрескиванием поверхности по границам зёрен, наводороживаемостью и шероховатостью [1, 2].

В связи с вышеизложенным существует насущная необходимость разработать методы оценки концентрации дисперсной фазы УДА в КЭП режущих дисков для последующего соотнесения полученных значений с факторами технологического характера, заложенными в основу гальваностегии.

Разработанная методика оценки концентрации дисперсной фазы УДА в КЭП режущих дисков основывается на многоступенчатой обработке оптического изображения поверхности их рабочей кромки. На первом этапе производилась оцифровка изображения (рис. 1), полученного с различным масштабом (250:1; 630:1) в интерференционном контрасте по Номарскому, когда перед плоскопараллельной пластинкой включается постоянно ориентированный поляризатор,

под которым располагаются призмы Волластона с результирующей разностью хода лучей 70 нм ( $\lambda/8$ , серый цвет 1-го порядка) для дифференциального разложения изображения, а над поляризатором размещается анализатор. Метод интерференционного контраста согласно Номарскому с дифференциальным разложением изображения посредством вспомогательного поляризатора хорошо зарекомендовал себя в области исследований по визуальному выявлению поверхностных дефектов, имеющих незначительные различия по толщине или показателю преломления, а также для оценки ширины скосов [3].

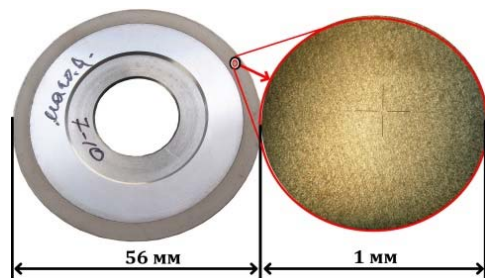


Рисунок 1 – Внешний вид алмазного режущего диска (слева) и увеличенное изображение участка ( $\varnothing$  1 мм, 250:1) КЭП режущего диска (справа)

Оцифрованное изображение поверхности КЭП в RAW формате обрабатывалось (без выравнивания уровня яркости в поле изображения) с помощью графических фильтров (программа Adobe Photoshop CS5) с целью выделения границ между Ni матрицей и дисперсной фазой УДА.

На втором этапе были изготовлены два алмазных диска с меньшей и большей концентрацией дисперсной фазы УДА соответственно, что обеспечивалось специально заданными факторами технологического характера. Далее эти диски по методике первого этапа для чистоты эксперимента подверглись групповой обработке в одном файле при неизменных режимах и настройках, начиная с оцифровки изображения, полученного в интерференционном контрасте по Номарскому с дифференциальным разложением изображения, с последующим выделением границ между Ni матрицей и дисперсной фазой УДА (рис. 2) при помощи графических фильтров (программа Adobe Photoshop CS5).

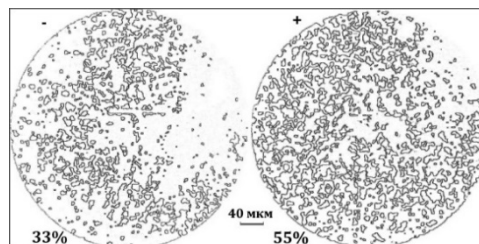


Рисунок 2 – Графическое изображение ( $\varnothing$  0,4 мм, 630:1) выделенных границ между Ni матрицей и дисперсной фазой УДА двух исследованных образцов с меньшей (слева) и большей (справа) концентрацией УДА

На третьем этапе графическое изображение границ между Ni матрицей и дисперсной фазой УДА программно обрабатывалось с целью получения количественной оценки протяженности границ, которая численно пропорциональна значению концентрации дисперсной фазы УДА, что составило для образца с меньшей концентрацией дисперсной фазы УДА – 33 %, а для образца с большей концентрацией дисперсной фазы УДА – 55 %.

Дальнейшая разработка данной методики предполагает получение релевантной выборки для статистической обработки результатов с целью повышения достоверности, что усложняется большой трудоёмкостью и материалозатратностью изготовления требуемого массива исследуемых образцов. Также необходимо программно автоматизировать процесс обработки графических файлов с последующим сравнением, сортировкой и архивированием данных, и с помощью SDK (software development kit) создать приложения для используемого пакета программ.

#### Литература

1. Хмыль А.А., Ланин В.Л., Емельянов В.А. Гальванические покрытия в изделиях электроники. Минск: Интегралполиграф, 2017. – 480 с.
2. Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Кузьмар И.И. Наноструктурированные тонкоплёночные материалы, содержащие ультрадисперсные агрегаты углерода, и их свойства // Наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей. Минск: ИТМО им. Лыкова. 2016. – С. 135–140.
3. Beyer H. Handbuch der Mikroskopie. VEB Verlag Technik, Berlin, 2 Aufl. 1977.

УДК 621.385.6

### УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОЩНЫХ ДМОП ТРАНЗИСТОРОВ

Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Прямые испытания п/п приборов для подтверждения заданной надежности требуют огромных затрат времени, оборудования, исследуемых образцов и энергоресурсов, поэтому, как

правило, применяются ускоренные испытания (УИ), которые являются типом физико-технического моделирования в сжатом масштабе времени. Для выявления потенциально слабых,

дефектных мест и механизмов отказов изготавливаемых приборов в качестве ускоряющих факторов используются: температура, механические нагрузки в виде линейных ускорений, ударов и вибраций, влажность, давление окружающей среды, электрическая нагрузка, радиационное воздействие.

Мощные ДМОП транзисторы в металлокерамическом корпусе типа КТ-97 работают, в основном, в режиме электронного ключа при максимальной токовой нагрузке порядка 30÷40 А. В процессе эксплуатации периодически происходит нагрев активной структуры транзистора, который будет тем выше, чем больше переходное тепловое сопротивление «п/п переход-корпус». Поэтому актуальной задачей является повышение устойчивости мощного транзистора к циклическому температурному воздействию.

Таблица

| Образец      | Начальное значение $R_{\text{тнк}2,1}$ , °С/Вт | Значение $R_{\text{тнк}2}$ после 500 т/у, °С/Вт | $R_{\text{тнк}2}/R_{\text{тнк}1}$ | ОМН $\sigma_{\text{max}}$ , МПа |
|--------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| №12 (Au-Si)  | 0,53                                           | 0,56                                            | 1,05                              | +69                             |
| №13 (Au-Si)  | 0,46                                           | 0,48                                            | 1,04                              | +65                             |
| №14 (Au-Si)  | 0,88                                           | <b>1,56</b>                                     | <b>1,77</b>                       | +73<br>-45                      |
| №16 (Au-Si)  | 0,73                                           | 0,77                                            | 1,05                              | +62                             |
| №8 (припой)  | 0,67                                           | <b>1,03</b>                                     | <b>1,54</b>                       | +18<br>-5                       |
| №9 (припой)  | 0,66                                           | <b>2,36</b>                                     | <b>2,58</b>                       | +7<br>-5                        |
| №20 (припой) | 0,92                                           | <b>2,38</b>                                     | <b>2,59</b>                       | 0                               |
| №21 (припой) | 0,88                                           | 0,89                                            | 1,01                              | +51<br>-5                       |

Монтаж кристаллов ДМОП транзисторов в корпус с золотым покрытием выполнялся на эвтектику Au-Si на установке монтажа п/п кристаллов ЭМ-4085, а в корпус с никелевым покрытием – в конвейерной печи на припой по касетной технологии сборки. После сборки по полному маршруту годные транзисторы подвергались длительным воздействиям термоударов (500 циклов) при -196 °С (5 мин.) и +200 °С (10 мин.) с последующей оценкой:

- уровня теплового сопротивления;
- значения остаточных внутренних напряжений (ОМН) (качественно и количественно) в структуре п/п кристаллов и характера искривления их планарной поверхности – методом лазерной интерферометрии [1];
- состояния внутренней структуры п/п кристалла (ближняя зона) и монтажного слоя (дальняя зона) при помощи лазерной фотоакустической интроскопии [2].

В Таблице приведены результаты изменения уровня теплового сопротивления после проведения УИ транзисторов тепловым воздействием.

В отношении образцов №№ 14, 8, 9, 20 было зафиксировано значительное увеличение уровня теплового сопротивления.

На основе микроинтерферограмм были реализованы матрицы деформации с последующим построением профиля исследуемых п/п кристаллов в трехмерном пространстве в «грубом» X,Y приближении (рис. 1, 2), а также были вычислены максимальные значения интегральных составляющих ОМН ( $\sigma_{\text{max}}$ ) (Табл.) и минимальные значения радиусов искривления их планарных поверхностей. Для образцов №№ 12, 13, 14, 16 характерны более высокие значения ОМН. На рис.1 приведены типовой качественный профиль поверхности п/п кристалла (рис. 1, а) и профиль п/п кристалла образца № 14 (рис. 1, б) с дефектной областью растягивающих напряжений ( $\sigma_{\text{max}} = -45$  МПа).

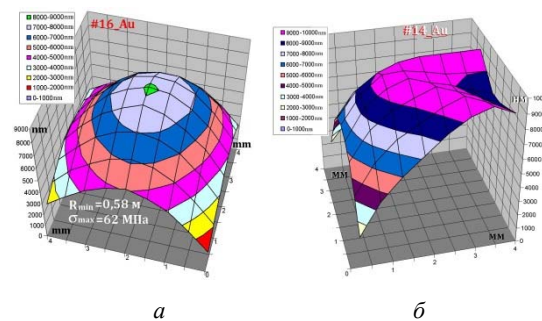


Рисунок 1 – Профили поверхности образцов №№ 16, 14

На рис. 2 приведен типовой профиль образцов №№ 8, 9, 21. Для них характерны седлообразная форма профиля, что вызвано суммарным воздействием полей растягивающих и сжимающих напряжений. Образец № 20 в ходе УИ почти полностью потерял сцепление с подложкой, о чём также говорит увеличение его теплового сопротивления в 2,59 раза.

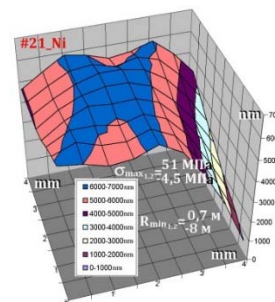


Рисунок 2 – Типовой профиль образцов №№ 8, 9, 21.

Исследование внутренней структуры монтажных конструкций «подложка – припой – п/п кристалл» проводилось методом лазерной фотоакустической интроскопии. На рис. 3 приведены лазерные фотоакустические топограммы

(ближняя зона) образцов транзисторов с нарушением целостности кристаллической структуры в виде обширных трещин, берущих начало из области сварных точек затворного межсоединения (левая сторона п/п кристаллов).

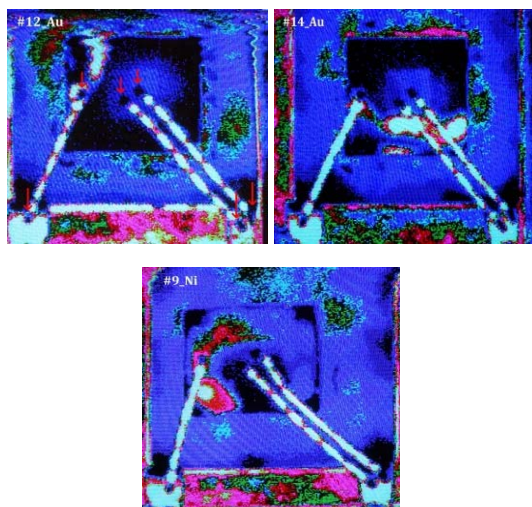


Рисунок 3 – Лазерные фотоакустические топограммы образцов транзисторов №№12, 14, 9 с нарушением целостности кристаллической структуры

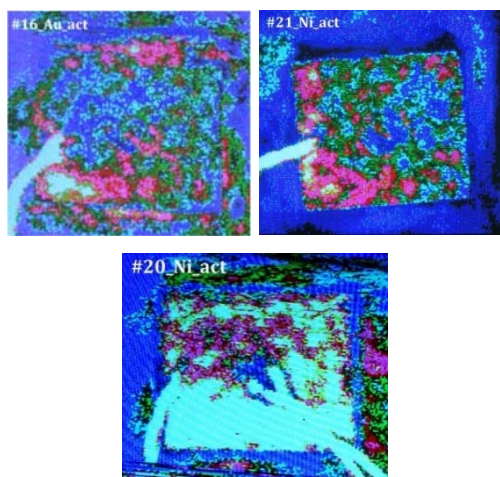


Рисунок 8 – Лазерные фотоакустические топограммы образцов №№ 16, 21, 20

На рис. 4 приведены лазерные фотоакустические топограммы (дальняя зона, охватывающая монтажную конструкцию «подложка – эвтектика/припой – п/п кристалл»), на которых области качественного соединения окрашены синим цветом, а области отсутствия адгезии – зелёным, красным и белым, что в большей степени касается образца № 20.

#### Выводы

1. Монтаж п/п кристаллов №№ 14, 21, 9, 8 является неудовлетворительным. Вследствие этого готовые изделия не будут обладать эксплуатационной надёжностью. Это относится ко всей группе образцов кассетной технологии сборки, причём монтажная конструкция образца № 20 разрушилась, о чём свидетельствует отсутствие остаточных механических напряжений.

2. Исходя из анализа топограмм, приведенных на рис. 3, в кристаллической структуре образцов №№ 12, 14, 9 образовались обширные трещины и выколы, пересекающиеся со сварной точкой одинарной перемычки (затвор) на контактной площадке кристалла. Это связано со сверхкритическим режимом сварки или нестабильностью работы ультразвукового генератора во время формирования межсоединений, также существенный вклад в нестабильность процесса сварки вносят пустоты и области частичной адгезии (или её отсутствие) в монтажном слое «подложка - эвтектика/припой - п/п кристалл», что присуще всем исследованным образцам.

#### Литература

1. Волкенштейн С.С., Хмыль А.А. Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС. / «Технологии в электронной промышленности», № 2, 2011. – С. 18–22.
2. Волкенштейн С.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. Сравнительная оценка альтернативных методов контроля качества и диагностики монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка» / «Производство электроники», № 5, 2017. – С. 118–120.

UDC 621.91.01:681.3.01:004.4

### COMPUTER MODELING OF DETAILS' ELASTIC STATE

Voloshko O.V., Vysloukh S.P.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Computer modeling is one of the effective methods for studying complex systems. Computer models are simple and convenient for computing experiments. Computer modeling provides an opportunity to study processes in dynamics, managing their duration, perform multiple tests of the initial model, to obtain various characteristics of the object in numerical or graphical form, to find the optimal design

solution without the production of prototypes. In computer modeling, the method of final elements, the method of final differences, the method of node potentials, etc., is used [1].

The use of the final elements' method for today is in fact the world standard for calculations of component designs. The basis of this is the universality of the method, which allows the only way to calcu-

late the design of parts with different properties of materials. Flexibility of the final elements' method provides multivariate design methods [2].

Therefore, the final elements' method is a universal tool for analyzing component designs and, among many CAD / CAM / CAE models, the software package for final element analysis, is important.

The main idea of the final elements' method is that any continuous value, such as temperature, pressure and displacement, can be approximated by a discrete model that is built on the set of piecewise continuous functions defined on a final quantity of subdomains. Piecewise continuous functions are defined by means of values of a continuous quantity at a final quantity of points in the domain under consideration.

A discrete model is very easy to create if we first assume that the numerical values of this value in each inner region are known. Then you can go to the general case. Consequently, when creating a discrete model of continuous value, proceed as follows: in this area, a final number of points is fixed. These points are called nodal points or nodes; the value of a continuous value at each point is considered as a variable to be determined; the area of definition of a continuous value is divided into a final number of areas called elements. These elements have common nodal points and in aggregate approximate the shape of the region; the continuous value is approximated for each element by a polynomial, which is determined by the nodal values of this bigness.

For each element it is determined by its polynomial, but the polynomials are selected so that the continuity of the value along the elements borders (which is called the element's function) is preserved. The choice of the elements' form and their functions for specific tasks determines the accuracy of an approximate solution and depends on the ingenuity and skill of the engineer [3].

The modern progressive software environment for solving engineering analysis' issues is FEMAP, which allows the creation of final element models of components, complex products and systems, and perform analysis of the results. FEMAP helps to clearly present a pattern of behavior of the product under investigation [4].

Using FEMAP numerical simulation tools it is possible to: evaluate and improve performance and product quality; reduce the financial costs of parts' manufacturing; compare different variants of construction geometry and materials used; optimize the design of the parts and reduce the materials' cost.

Final elements' method is a powerful tool for determining the potential deformations caused by the machining process. Using the results of the final elements analysis, one can project and predict potential deformations and reduce overall production costs.

The initial calculations' stage of the structural element is an analysis of the body's geometry, condi-

tions of its loading, material properties, and the creation of a calculation model. The calculation model is a certain approximation to the real body from the material of its production and operating conditions. It allows doing a numerical calculation of the design of a part based on its geometry, material, initial and boundary conditions [5].

In order to perform computer modeling, the «rocker» piece with a length of 155 mm, the largest width of 30 mm and a height of 9.5 mm has been selected and has an axial hole with a diameter of 6.1 mm made of steel 40X DSTU 7806: 2015.

The drawing of the details in the software system FEMAP began with the definition of the coordinates of the «final and transitive» points of this detail and their inclusion in the program. After drawing these points, they were connected by lines, which allowed obtaining a two-dimensional drawing of the detail. Then, using the «Geometry → Boundary Surface → From Curves ...» command, the boundary surface is constructed. From the constructed boundary surface, with the help of the command "Geometry → Solid → Extrude» received a solid detachment. In the future, using the same command, they rounded the details of the edges and made the holes in the necessary places.

To create a final elements' model, you need to add all the material's characteristics of the detail «rocker» (the command «Model → Material ...»). In these characteristics, all necessary values of its physical and mechanical properties are indicated: Poisson's coefficient, material density, Young's modulus, and others.

The command «Model → Property...» initiated the dialog box «Define Property», which called the button «Elem / Property Type ...» for the corresponding panel in which the type of final element "Solid" was selected. To create a final element grid based on the created «firm» body, the command «Mesh → Geometry → Solids ...» was used. It calls the Automesh Solids dialog box, which selected the previously created final elements' properties, and has the option «Mid-side Nodes», which creates intermediate final elements' nodes for the approximation of body geometry. After pressing the «OK» button, the KES generation was performed. Next, you need to specify the boundary conditions that simulate fastening the part in the assembly unit. Load on the model represented as arrows in its direction and numerical value.

Thanks to the extensive final element library of the desired shape, the mesh generators of Femap SW allow the creation of high-quality CE mesh and obtain accurate solution results. FEMAP gives you the ability to completely control all grid generation parameters, such as grid spacing, creating a grid for small parts, rising coefficients, accounting for small geometric elements, etc. With complex geometry, it is often necessary to modify the grid in those areas where special calculation accuracy is required. The tools of the Meshing Toolbox of the FEMAP soft-



ware allow you to do this by modifying the grid step parameters in the source model in interactive mode; the grid will be updated automatically. In addition, by modifying the grid, you can immediately analyze the quality of the final elements created by means of a graphical scale in order to make sure that the created final element model meets the quality criteria

To display a tense-deformed state of the detail, the command «View→ Select» prompts the appropriate dialog box «View Select», where in the section «Model Style» the option «Draw Model» is selected, in the section «Deformed Style» – «Deform», in the section «Contour Style» – «Beam Diagram». The button "«Deformed and Contour Data...» initiates the dialog box «Select PostProcessing Data», where in the section «Output Vectors» was selected from the list: «1..Total Translation» corresponding to the total vector displacement, and in the section «Contour» – «60031..Solid Von Mises Stress», corresponding to the equivalent stress on the hypothesis of the energy of molding (Mises) for volume KE. After pressing the button «OK» the created model appears in a deformed state. The right side of the graphical interface of the program is a color diagram that reflects the value of equivalent stresses for the Mises hypothesis for volume KE [5].

FEMAP allows you to view text information about the results of the analysis. To this end, the command «List → Output → Unformatted ...» was executed. In the dialog box «Entity Selection – Select Output Set(s) to List», all items were selected, and in the dialog box «List Unformatted Output», the line «1..Total Translation» was selected for information on the total vector displacement. Below the working plane in the dashboard «Messages» is a list of KE numbers and values of the corresponding values.

The modelling results of the detail's elastic state made it possible to determine the localization loca-

tion and the values of stresses and deformations that arise during the operation of the rocker in the assembly unit. Thus, the method of final elements is a powerful tool for determining the potential deformation caused by the machining process. Using the results of the analysis by the final elements' method, it is possible to project and predict potential deformations and reduce the total cost of production.

### Литература

1. Компьютерное моделирование [Электронный ресурс] [https://ru.wikipedia.org/wiki / Компьютерное моделирование](https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерное_моделирование).
2. Пасічник О.А. Технології комп'ютерного проектування та моделювання напружено-деформованого стану. Вісник Хмельницького національного університету, № 3, 2016 (237) – С. 172-175.
3. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. Основы метода конечных элементов и його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – 380 с.
4. Волошко О.В., Вислоух С.П. Комп'ютерне моделювання параметрів поверхневого шару деталей. // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2018. – С. 63–64.
5. Барандич К.С., Вислоух С.П. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)/ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Вип. 2 (41). – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – С. 228–232.

УДК 546.02+546.05

### УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гайдук Ю.С.<sup>1</sup>, Реутская О.Г.<sup>2</sup>, Натаров В.О.<sup>1</sup>, Савицкий А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В последнее время достаточно широко изучаются возможности ультразвукового метода для получения нанодисперсных оксидов металлов. Известно, что в большинстве случаев уменьшение размера частиц и увеличение удельной поверхности приводит к заметному возрастанию газовой чувствительности полупроводниковых оксидов.

Одноэлектродные полупроводниковые резистивные датчики, представляющие собой керамическую капсулу на спирали из тонкой платиновой проволоки (20 ÷ 50 мкм), нашли широкое применение для анализа газов различной хими-

ческой природы, в частности для определения содержания кислорода, метана, пропана, монооксида углерода, хлора и аммиака [1, 2]. В качестве газочувствительного материала в таких сенсорах обычно выступают твёрдые растворы (Ga, In)2O3, получаемые золь-гель методом. С целью повышения газоадсорбционной активности к тем или иным газам в состав указанной композиции могут вводиться различные добавки. В частности, добавка WO<sub>3</sub> позволяет практически на порядок повысить чувствительность одноэлектродных сенсоров к диоксиду азота [3].

В данной работе исследовалось влияние ультразвукового сопровождения при золь-гель-синтезе оксидов индия, галлия и вольфрама с целью получения газочувствительных материалов с более развитой удельной поверхностью (меньшим размером кристаллитов, соответствующим размеру областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения, ОКР).

**Методика эксперимента.** Оксид вольфрама получали из 1,23 М водного раствора вольфрамата натрия  $\text{Na}_2\text{WO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$  путем капельного вливания в 12 М раствор азотной кислоты.

Для получения золя  $\text{In}(\text{OH})_3$  к 0,38 М водному раствору нитрата индия  $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \times 4,5\text{H}_2\text{O}$  капельно добавляли 9,24 М водный раствор аммиака.

Для получения золя  $\text{Ga}(\text{OH})_3$  к 0,66 М водному раствору  $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \times 8\text{H}_2\text{O}$  капельно добавляли 9,24 М водный раствор аммиака. Полученные осадки тщательно промывали декантацией от примесей электролитов. Золи стабилизировали добавкой 150 мкл конц.  $\text{HNO}_3$ .

Для формирования чувствительного элемента сенсора золь по каплям наносили на разогретую постоянным током спираль из платиновой микропровода, после чего полученную керамическую капсулу отжигали 2 ч током 140 мА. Сенсорный отклик ( $S$ , мВ) определяли по формуле  $S = U_0 - U_g$ , где:  $U_0$  – напряжение на выводах сенсора при нагреве спирали постоянным током 11 – 140 мА на воздухе;  $U_g$  – при воздействии анализируемой газовой смесью. Потребляемая мощность рассчитывалась по формуле  $P = U_0 \times I_0$ . Рентгенографические исследования проводились при помощи дифрактометра ДРОН-3 (Co-K $\alpha_1$ -излучение).

Средние размеры кристаллитов (области когерентного рассеяния, ОКР) определяли по формуле Дебая–Шеррера (1):

$$D = 0,9\lambda / \beta \cos \alpha \quad (1)$$

Параметры кристаллической решётки определяли при помощи компьютерной программы UnitCell по методу Холланда–Редфрена.

Сравнивались эксплуатационные характеристики сенсоров, для получения которых использовались приготовленные разными способами золи: по выше описанной методике, и с дополнительным применением ультразвукового воздействия (29 кГц) при проведении смешения реагентов (раствор солей металлов по каплям добавляли к раствору аммиака). Величина  $S$  рассчитывалась как среднее значение для трёх сенсоров в каждой серии. Относительная погрешность измерений  $S$  не превышала 5 %.

**Результаты исследования.** Отжиг при 200 – 800 °С ксерогеля вольфрамовой кислоты [PDF 18–1420] приводил к формированию моноклинной структуры  $\text{WO}_3$  [PDF 87–2404]. После отжига при 200 – 850 °С (2 ч) образцы имели ОКР от 60 до 200 нм. При ультразвуковом сопровождении синтеза ксерогель  $\text{H}_2\text{WO}_4$  уже со-

держал в значительном количестве частицы  $\text{WO}_3$  [PDF 87–2404], а материал, отожжённый при 200 – 850 °С, характеризуется более низкими значениями ОКР. Так, отжиг ксерогеля приводил к образованию оксида вольфрама с ОКР 90–100 нм (300 °С, 2 ч) и 160 – 170 нм (600 °С, 2 ч) при стандартном проведении золь-гель процесса. В то же время для материала, полученного с ультразвуковым сопровождением, эти значения составили 50 и 140 – 150 нм, соответственно.

Материал, полученной высушиванием гидроксида индия, представлял собой аморфный ксерогель. Последующий отжиг приводил к разложению  $\text{In}(\text{OH})_3$  (PDF 16–161) и образованию  $\text{In}_2\text{O}_3$  [PDF 6–416]. По мере увеличения температуры отжига степень кристаллизации оксида индия увеличивалась, ширина пиков и ОКР возрастала, что также указывает на протекание процесса спекания. Отжиг (2 ч) ксерогеля гидроксида индия при 200, 300, 600 и 850 °С приводил к формированию нанокристаллических порошков с размерами ОКР 10 – 12, 20, 35 и 50 нм, соответственно. Размер ОКР порошка ксерогеля, полученного с ультразвуковым сопровождением (29 кГц), и отожжённого при 300 °С, составил 8–10 нм.

На рисунке 1 представлена зависимость выходного сигнала  $S$  одноэлектродных датчиков к 0,3 % об. СО в азоте от тока нагрева и потребляемой мощности сенсоров.

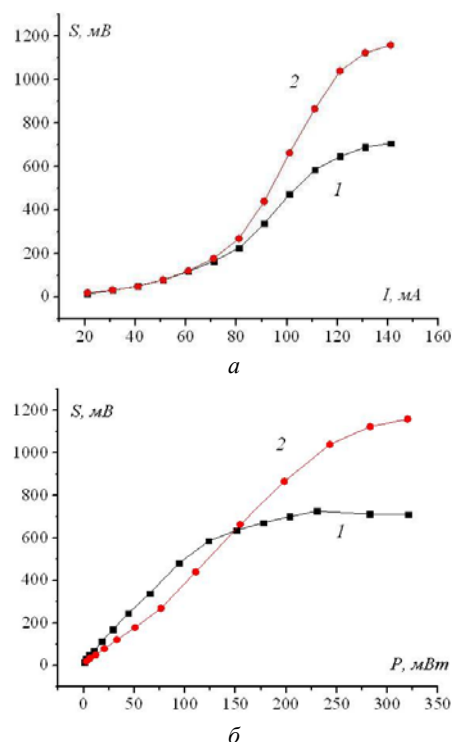


Рисунок 1 – Зависимость выходного сигнала  $S$  одноэлектродных датчиков к 0,3 % об. СО в азоте от: а) тока нагрева  $I_0$ , мА б) потребляемой мощности,  $P$ , мВт: 1 – без воздействия ультразвука; 2 – с ультразвуковым воздействием на этапе синтеза оксидной композиции

В области значений потребляемой мощности 150–200 мВт наблюдаются более высокие выходные сигналы для сенсоров, у которых чувствительный элемент изготовлен из оксидной композиции, полученной с ультразвуковым воздействием. При этом при потребляемой мощности 200 мВт увеличение выходного сигнала превысило 20 %.

Выходной сигнал сенсоров может увеличиваться за счет усиления структурного разупорядочения оксидной композиции при ультразвуковом воздействии, а также за счет возрастания удельной поверхности в результате снижения размеров кристаллитов и изменения морфологии частиц. По данным рентгенофазового анализа, при термической обработке ксерогеля, полученного из совмещённых золь гидроксидов индия и галлия, в интервале 300–600 °С (2 ч) образуется твёрдый раствор  $(\text{Ga},\text{In})_2\text{O}_3$  на основе кубической структуры оксида индия  $\text{C-In}_2\text{O}_3$ . Образцы композиции  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  (отжиг 300 °С, 2 ч), полученные в сопровождении ультразвукового воздействия, имели размеры областей когерентного рассеяния, значения которых принято отождествлять с физическими размерами кристаллитов, ОКР = 12 нм, а в отсутствие ультразвукового воздействия – ОКР = 20 нм (параметр кристаллической решётки составил в обоих случаях  $a=10,12 \text{ \AA} \pm 0,04$ ).

Ультразвуковой синтез оксидов вольфрама ( $\text{WO}_3$ ) и индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ), а также твёрдого раствора  $(\text{Ga},\text{In})_2\text{O}_3$ , является эффективным способом получения нанодисперсных поликристаллических материалов.

Ультразвуковое сопровождение в процессе золь-гель синтеза позволяет получить материалы с большей удельной поверхностью и меньшим эквивалентным диаметром частиц, что изменяет ширину запрещённой зоны и энергию активации проводимости. Такие изменения приводят к росту газовой чувствительности и снижению рабочей температуры датчиков.

#### Литература

1. Malchenko, S.N. One-electrode semiconductor sensors for detection of toxic and explosive gases in air / S.N. Malchenko, I.N. Lychkovsky, M.V. Baykov // Sens. and Actuators B. Chem. – 1992. – Vol. 7. – Issue 1–3. – P. 505–506.
2. Korotchenkov, G. Practical aspects in design of one-electrode semiconductor gas sensors: Status report / G. Korotchenkov // Sens. and Actuators B. Chem. – 2007. – Vol. 121. – P. 664–678.
3. Гайдук, Ю.С. Полупроводниковые датчики диоксида азота на основе композиции  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  / Ю.С. Гайдук, А.А. Савицкий, В.А. Ломоносов // Известия НАНБ. Серия хим. наук, 2018. – Т. 54, № 2. – С. 146–153.

УДК 535.317

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА ОРТОФЕРРИТА ВИСМУТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

Головач Р.В.<sup>1</sup>, Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Шеченок А.А.<sup>2</sup>, Шамкалович В.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Потребность в нанокompозитных материалах обусловлена необходимостью разработки новых методов получения интеллектуальных функциональных наноматериалов для приборов автоматики, сенсоров и других устройств микроэлектроники. Важнейшими требованиями к подобным материалам являются высокие эксплуатационные характеристики, простота и надежность синтеза и использования, универсальность, позволяющая как сочетать данные материалы с различными видами подложек, так и возможность использовать их как индивидуальное изделие, а также экономичность и низкое энергопотребление. В этой связи большое внимание уделяется разработке новых видов керамических наноматериалов, а именно макропористых композитов, отвечающих всем заявленным требованиям [1].

На основании вышеизложенного сформировалось основное направление исследований и цель работы, заключающаяся в разработке состава

и технологических параметров синтеза сегнетокерамических наноматериалов и получение функциональных покрытий, в т. ч. нанокompозитов для интегрированных исполнительных элементов приборов и устройств автоматики.

Синтез модифицированного ортоферрита висмута проводился двумя методами: высокотемпературным спеканием порошков и химическим, обеспечивающим экзотермическую реакцию в растворах компонентов. В качестве исходных материалов для синтеза ортоферрита висмута традиционным методом спекания использовались оксиды  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , в качестве модифицирующих добавок –  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  и  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , которые вводились в количестве 0,1–0,2 мол. долей. В зависимости от вида добавки образцы обжигались при температурах 800–925 °С.

По второму способу получение мультиферроиков проводилось с использованием энер-

гоэффективного нитрат-цитратного метода синтеза, который включает приготовление водного раствора, содержащего нитраты металлов и лимонную кислоту, и термическую обработку этого раствора. При нагревании до 60 °С раствор трансформируется в гель, при 95 °С происходит разложение нитрат-цитратного раствора. Полученные порошки прокаливались при 450 °С и измельчались. Отпрессованные и высушенные образцы подвергались повторному спеканию при 800 °С со скоростью подъема температуры 10 °С/мин с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 мин.

На первом этапе было исследовано влияние модифицирующих добавок при синтезе ортоферрита висмута. Зависимость среднего значения водопоглощения опытных образцов от количества модификатора, обожженных при температурах 850 и 900 °С приведена на рисунке 1.

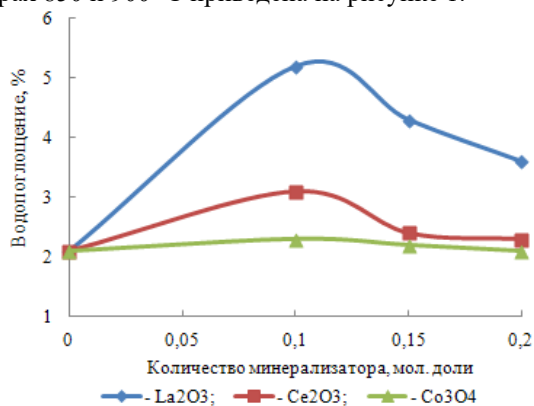


Рисунок 1 – Зависимость водопоглощения образцов с различным содержанием модификатора, обожженных при температуре 900 °С (с La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и 850 °С (с Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)

Как видно из рисунка 1, водопоглощение образцов с минерализатором в количестве 0,1 мол. доли возрастает, а далее при повышении до 0,2 мол. доли уменьшается, что связано с их активизирующим действием, при этом минимальным водопоглощением (1,94 %) обладают образцы с добавкой Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

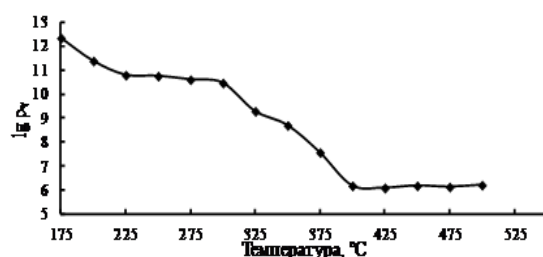


Рисунок 2 – Логарифмическая зависимость удельного сопротивления образца с добавкой Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2 мол. доли) от температуры измерения

Электрическая проводимость является одной из важнейших характеристик синтезируемых материалов. Сопротивление полупроводников с

ростом температуры уменьшается, проводимость увеличивается по причине того, что с ростом температуры в полупроводнике увеличивается число свободных электронов и «дырок» [2]. Графическая зависимость удельного объемного электрического сопротивления образца с оптимальной церийсодержащей добавкой от температуры измерения показана на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, удельное объемное электрическое сопротивление для исследуемых образцов равномерно уменьшается с увеличением температуры, что обусловлено зависимостью электропроводимости материала от концентрации носителей заряда, их величины и подвижности. Исследуемые материалы имеют ионы в узлах кристаллической решетки с невысокой подвижностью (отсутствуют ионы щелочных металлов). С ростом температуры увеличивается амплитуда и частота колебаний ионов в узлах кристаллической решетки, в результате чего повышается электропроводимость материала. Для обычных диэлектриков логарифмическая зависимость электросопротивления линейная, однако, для сегнетоэлектрических материалов на кривых имеются перегибы, что обусловлено трансформацией их структур.

При синтезе ортоферрита висмута нитрат-цитратным методом в результате экзотермических реакций образуются нано- и микродисперсные частицы, которые однако образуют между собой более или менее прочные агрегаты. Для диспергации агрегатов были использованы прокаливание проб, растирание ручное и механическое в агатовой ступке и планетарной мельнице. Для исследования дисперсности синтезированных материалов использовался метод лазерной гранулометрии (рисунок 3).

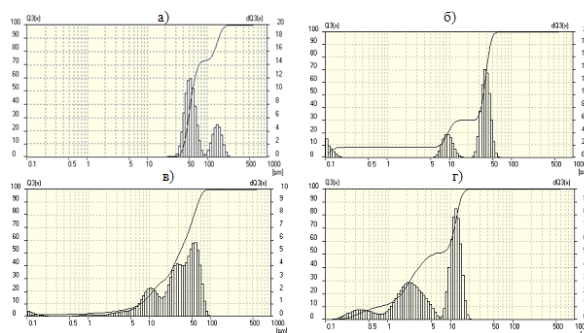


Рисунок 3 – Дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам синтезированного ортоферрита висмута (а), подвергнутого прокаливанию (б), с первичной диспергацией и растиранием в агатовой ступке (в), подвергнутого прокаливанию и помолу в планетарной мельнице (г)

На основании данных рисунка 3 видно, что агрегаты синтезированного материала имеют размеры от 30 до 250 мкм. Прокаливание приводит к распаду агрегатов и выделению частиц

в нанодисперсном диапазоне (менее 0,15 мкм): значительно уменьшается максимальный размер частиц (менее 150 мкм), и агрегаты представлены в основном тремя фракциями. Растирание в агатовой ступке приводит к изменению дифференциальной кривой распределения и увеличению количества частиц с размером от 10 до 50 мкм. Более эффективна диспергация агрегатов в планетарной мельнице: максимальный размер частиц не превышает 10 мкм, значительно увеличивается содержание частиц менее 5 мкм и нанодисперсного диапазона.

Установлены закономерности изменения свойств синтезированных образцов в зависимости от вида и количества модификаторов. Синтезированы и исследованы керамические материалы на основе феррита висмута с использованием модифицирующей добавки  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  в количестве 0,1 мол. доли методами традиционного спекания и химическим синтезом. Получены функциональные керамические покрытия на микропористых подложках с использованием различных вариантов подготовки исходной керамической субстанции необходимого микро- и нанодисперсного диапазона.

При разных методах их нанесения разработанные материалы могут использоваться для изготовления различных компонентов электронной техники [3], в т. ч. для функциональных покрытий микропористых структур, используемых для изготовления средств автоматизации и автоматики.

#### Литература

1. Макоед, И.И. Получение и физические свойства мультиферроиков: монография / И.И. Макоед; Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2009. – 181 с.
2. Бабич, В.М. Технология производства ферритов и радиокерамики: учеб. пособие для вузов / В.М. Бабич. – М. : Высшая школа, 1984. – 223 с.
3. Магнитная керамика на основе модифицированного феррита висмута / Р.В. Головач, О.А. Сергиевич, Ю.С. Шинелько, Е.М. Дятлова // 71-я Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сб. материалов конф., Ярославль, 18 апр. 2018 г. в 3 ч. [Электр. ресурс]. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 100–103.

УДК 539.2:669.(1-8)

### МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ ОЛОВО–СВИНЕЦ, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

Гольцев М.В.<sup>1</sup>, Белая О.Н.<sup>1</sup>, Иванов А.А.<sup>1</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>2</sup>, Гусакова С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Сплавы на основе системы олово-свинец характеризуются высокими технологическими параметрами и используются в различных отраслях промышленности. На их основе изготавливаются легкоплавкие припои, подшипниковые сплавы, сплавы для кабельных оболочек, элементы электрических цепей и др. В последние десятилетия успешно развиваются нетрадиционные технологии получения материалов, к которым относятся и высокоскоростное затвердевание расплава, позволяющее достичь скоростей охлаждения выше  $10^5$  [1]. Структура сплавов, получаемых при сверхвысоких скоростях охлаждения, отличается от структуры, образующей в сплавах при малых и средних скоростях охлаждения. В связи с этим является актуальным исследование структуры и физических свойств сплавов системы олово-свинец, используемых в промышленности, например, эвтектического сплава.

Эвтектический сплав (Sn – 27 ат. % Pb) изготовлен сплавлением компонентов в кварцевой ампуле. Расплав сначала заливался в графитовую изложницу и затвердевал в форме стержня длиной 10 см и поперечным сечением  $3 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Кусочек

сплава массой ~ 0,15 г расплавляли и инжигировали на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Расплав растекался тонким слоем на поверхности кристаллизатора и затвердевал в виде фольги длиной до 10 см и шириной до 10 мм [1]. При исследовании использовались фольги толщиной 30 ... 100 мкм. Исследование микроструктуры фольг быстрозатвердевшего сплава выполнено на растровом электронном микроскопе LEO-1455 VP (Германия) с рентгеноспектральным микроанализатором Aztec Energy Advanced X-Max80 (Великобритания), позволяющим определить элементный состав и распределение компонентов, а также с дифракционной приставкой фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5 (Великобритания), благодаря которой исследована зеренная структура фольг. Для определения фазового состава и текстуры применялся рентгеноструктурные исследования, проводимые на дифрактометре ДРОН-4. Полусная плотность дифракционных линий рассчитывалась по методу Харриса [2]. Исследование микроструктуры проводилось со стороны А фольги, контактирующей с кристал-

лизатором, и с ее противоположной стороны *B*. Определение параметров микроструктуры проведено методом случайных секущих [3]. Испытание растяжением выполнялось на универсальной разрывной машине Testometric M350-10Ct при комнатной температуре. Измерения микротвердости  $H_{\mu}$  фольг выполнено на приборе ПМТ-3. Погрешность измерения  $H_{\mu}$  составила 4 %.

Изображение микроструктуры поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb, полученное растровым электронным микроскопом, представлено на рис. 1. Наблюдаются светлые и темные участки.

На рентгенограмме быстрозатвердевшей фольги сплава наблюдаются дифракционные линии олова (200, 101, 220, 211 и др.) и свинца (111, 200, 220, 222 и др.). С помощью рентгеноспектрального микроанализа установлено, что в белых участках находится свинец, а в черных олово.

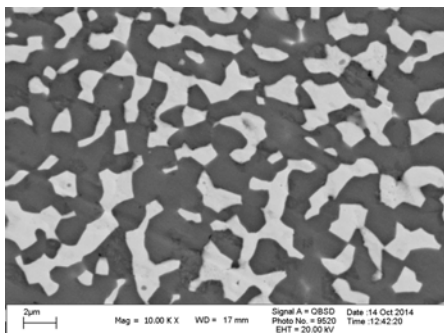


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb

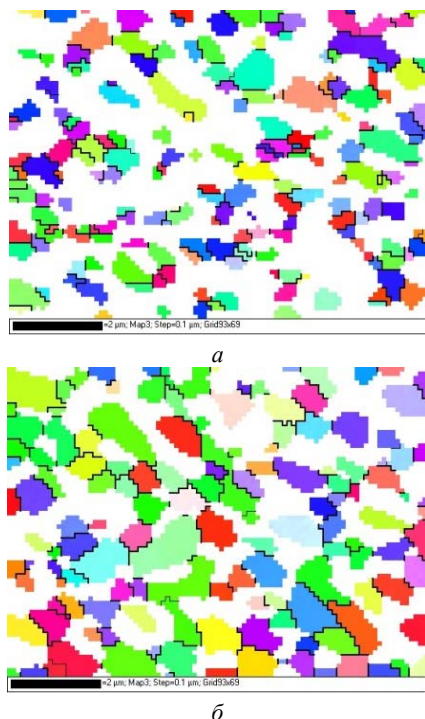


Рисунок 2 – Зеренная структура свинца (а) и олова (б)

Средняя длина хорд свинца  $d_{Pb} = 0,8$  мкм, олова  $d_{Sn} = 1,8$  мкм. Удельная поверхность межфазной границы  $S = 1,2$  мкм<sup>-1</sup>.

Изображение зеренной структуры выделений свинца и олова быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb приведено на рис. 2. Черным жирным линиям на сечениях фаз соответствуют высокоугловые границы (ВУГ), а тонким – малоугловые границы (МУГ).

Установлено, что фольги имеют микрокристаллическую структуру (рис.2). Средняя длина на сечениях зерен свинца и олова менее 0.8 мкм и 1,8 мкм соответственно. Удельная поверхность границ зерен не превышает 0,3 мкм<sup>-1</sup>. В быстрозатвердевших фольгах формируется текстура (111) свинца и (100) олова. Ее образование обусловлено тем, что соответствующие кристаллографические плоскости являются наиболее плотноупакованными.

Изменения межплоскостных расстояний  $d_{111}$  свинца и  $d_{100}$  олова при выдержке при комнатной температуре (20°C) в течение 26 ч находятся в пределах погрешности измерения. При этом наблюдалось уменьшение ширины дифракционных линий 111 свинца и 100 олова на 30 и 40 % соответственно, что обусловлено уменьшением микродеформаций из-за улучшения структуры межфазных границ и границ зерен.

Выполнены измерения микротвердости  $H_{\mu}$  быстрозатвердевших фольг и массивных образцов эвтектики. Микротвердость фольг (25 МПа) меньше  $H_{\mu}$  массивных образцов (205 МПа), полученных при скорости охлаждения 10<sup>2</sup> К/с. Наблюдается монотонное увеличение  $H_{\mu}$  фольг от 25 МПа до 34 МПа за 26 ч. Аналогичные изменения микротвердости наблюдались ранее для фольг эвтектических сплавов бинарных систем Sn – Bi, Bi – In и In – Sn, полученных также высокоскоростным затвердеванием [1].

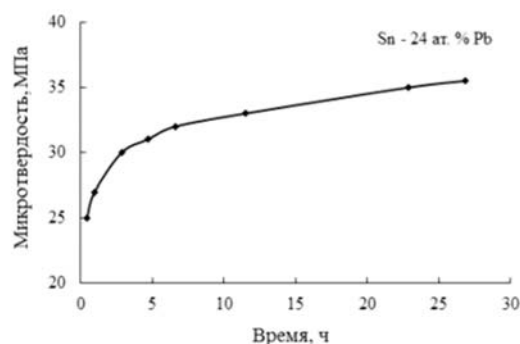


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb от времени выдержки при комнатной температуре

Комнатная температура для исследуемого сплава является высокой. В этом случае границы зерен являются разупрочненными зонами [10]. Пластическая деформация сплава будет обусловлена скольжением внутри зерен и зернограницным проскальзыванием. Поэтому микротвер-

дость фольги меньше микротвердости массивных образцов. Однако благодаря диффузионным процессам происходит улучшение структуры границ зерен. Доля зернограничного проскальзывания в общей величине деформации уменьшается, что и является причиной увеличения микротвердости фольг в процессе выдержки при комнатной температуре.

Испытания фольг растяжением проведены через 1 сутки после изготовления фольги. На кривой растяжения сначала наблюдается увеличение напряжения с ростом деформации (до  $\varepsilon_1 = 4\%$ ), а затем его уменьшение. Максимальное напряжение  $\sigma_{\max} = 8,6$  МПа. Достижимое макси-

мальное удлинение  $\varepsilon_{\max} = 100\%$ . Кривая растяжения зависит от времени выдержки фольги при комнатной температуре с момента ее изготовления. С увеличением времени выдержки фольги до 60 суток происходит увеличение  $\sigma_{\max}$  до 16 МПа и уменьшение  $\varepsilon_{\max}$  до 43%.

#### Литература

1. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
2. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
3. Салтыков С.А. Стереология в металловедении. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.

УДК 669.(6-8):539.2

### ВРЕМЕННАЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА Sn-Zn-Bi-In

Гусакова О.В.<sup>1</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>2</sup>, Гусакова С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Эвтектические сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, в частности в электронной промышленности для пайки. Миниатюризация изделий электронной промышленности приводит к необходимости изготовления материалов припоев в виде дисперсных порошков, тонких проволок, фольг [1]. Перспективным методом изготовления припоев в виде фольг является сверхбыстрая закалка из расплава (СБЗР). Припой, полученные этим методом имеют ряд преимуществ, по сравнению с массивными. Использование фольг позволяет уменьшить расход материала, осуществлять пайку тонких изделий. Высокая химическая однородность материала обеспечивает сужение температурного интервала плавления и кристаллизации и уменьшение времени нагрева для получения гомогенного расплава, что снижает деструктивное влияние высокой температуры на элементы пайки [2]. Однако для низкоплавких эвтектических сплавов микроструктура и свойства зависят не только от условий, при которых протекает затвердевание, но и от времени выдержки при комнатной температуре после изготовления. Для легкоплавких эвтектических сплавов при нормальных условиях гомологическая температура имеет значение около 0,7. В этом случае интенсивно протекают диффузия и структурно-фазовые превращения. В связи с этим исследования изменения микроструктуры быстрозатвердевших фольг эвтектических сплавов Sn – Zn – Bi – In в процессе старения являются актуальными.

Фольги сплава получались при затвердевании слоя расплава, растекшегося по внутренней поверхности вращающегося медного кристаллизатора. При толщине исследованной фольги 50-60 мкм

скорость охлаждения расплава  $\approx 10^5$  К/с. Исследовалась микроструктура поверхностей фольги через 30 минут, 5 и 25 часов, а также поперечного сечения фольги при старении в течение 50, 100 и 700 часов и после изохронного отжига при 60 и 100 градусах в течение 20 минут. На рисунке 1 приведена микроструктура поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору (А) и свободно затвердевающей поверхности (В) фольг после выдержки при комнатной температуре.

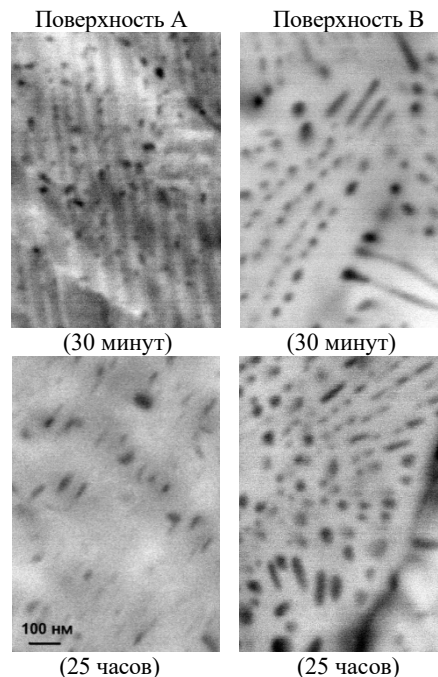


Рисунок 1 – Микроструктура поверхностей быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8,0 мас. % Zn – 3,0мас. % Bi – 4,0 мас.% In

С помощью рентгеноспектрального микроанализа и рентгеноструктурных исследований установлено, что темные включения соответствуют фазе цинка. Впервые выявленной особенностью микроструктуры фольг сплава Sn–8мас.%Zn–3,0мас.%Bi–4,0мас.%In является образование в тонком приповерхностном слое поверхности А модулированной структуры. Наблюдаемые светлые и темные полосы шириной 40–50 нм могут быть образованы слоями твердого раствора на основе олова с разной степенью пересыщения цинком. Аналогичные слои на поверхности В (рис.16) быстро распадаются на отдельные частицы. На поверхности А распад слоев на отдельные вытянутые частицы происходит в течение 24 часов.

Изменение микроструктуры при отжиге изучались при исследовании поперечных сечений фольг. На рисунке 2 приведены микроструктуры в поперечном сечении фольги при старении и изохронном отжиге.

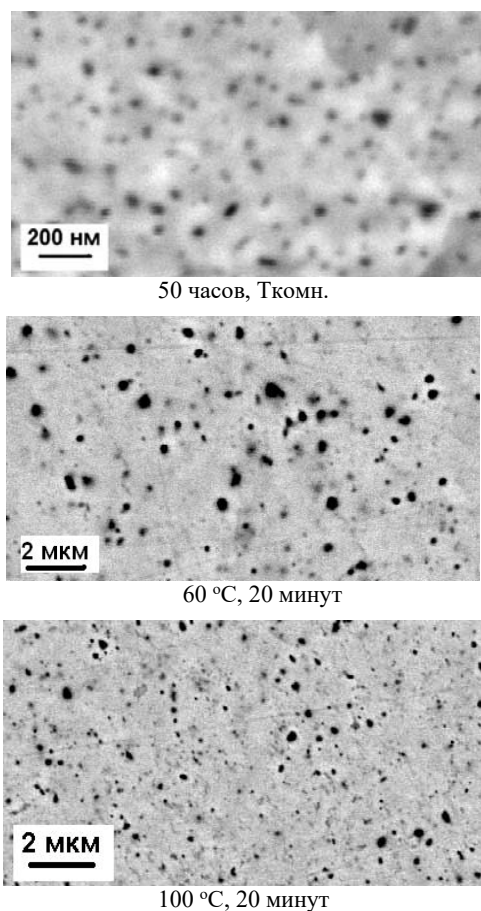


Рисунок 2 – Микроструктура фольги сплава Sn – 8,0 мас.% Zn – 3,0мас.% Bi – 4,0мас.% In при изохронном отжиге

Зависимость среднего размера частиц цинка от времени выдержки при комнатной температуре приведена на рисунке 3. Наиболее интенсивно увеличение среднего размера частиц Zn

при комнатной температуре протекает в течение нескольких часов после изготовления. Это обусловлено тем, что рост частиц происходит как за счет растворения мелких включений и присоединением атомов к более крупным включениям, так и за счет распада пересыщенного твердого раствора цинка в олове.

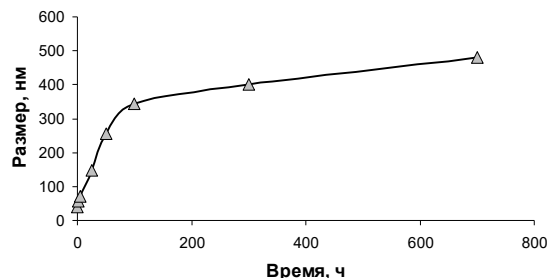


Рисунок 3 – Зависимость среднего размера частиц цинка от времени выдержки при комнатной температуре

При изохронном отжиге наблюдается увеличение размера включений цинка и их сфероидизация, что обусловлено стремлением системы к минимуму поверхностной энергии. На рисунке 4 представлено распределение частиц по размерным группам при изохронном отжиге при 50 °C и 80 °C в течение 20 минут .

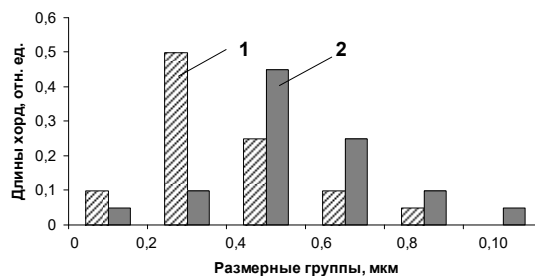


Рисунок 4 – Гистограмма распределения длин хорд цинка в фольге сплава Sn–8мас.%Zn–3,0мас.%Bi–4,0мас.%In по размерным группам: 1 – отжиг при 60°C в течение 20 мин, 2 – отжиг при 100°C в течение 20 мин

Таким образом, быстрозатвердевшие фольги сплава Sn–8мас.%Zn–3,0мас.%Bi–4,0мас.%In затвердевают с образованием твердого раствора на основе олова пересыщенного висмутом, индием и цинком.

В результате распада твердого раствора выделяются только включения цинка, размеры которых увеличиваются при старении и отжиге за счет стремления системы к уменьшению поверхностной энергии.

#### Литература

1. Лашко С.В. Пайка материалов. – М. : Машиностроение, 1988. – 379 с.
2. Гусакова О.В., Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие сплавы олова. – Минск : РИВШ, 2012. – 150 с.



УДК 538.9:669.715

## МИКРОСТРУКТУРА ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

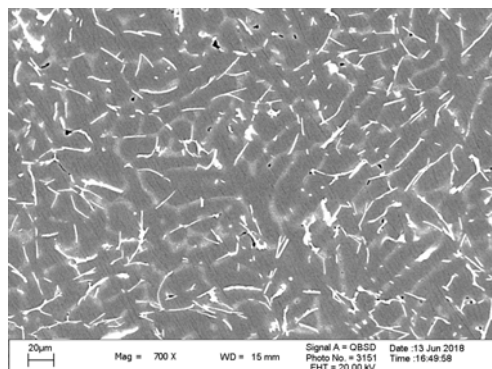
Силумины занимают третье место после сталей и чугуна по использованию в промышленности. Промышленное применение силуминов обусловлено их высокой жидкотекучестью, низкой склонностью к образованию усадки при литье, возможностью пайки и сварки, высокой коррозионной стойкостью и т. д. Основной нерешенной проблемой деформируемых силуминов (доэвтектических и эвтектического составов) получаемых традиционными методами является высокая хрупкость, поскольку они характеризуются неоднородностью и крупнодисперсностью фаз, в том числе кремния.

Очевидно, что для устранения вышеописанных недостатков необходимо использовать методы синтеза материалов обеспечивающие однородную структуру и измельчение фазовых составляющих, что приведет к оптимальным технологическим и механическим свойствам.

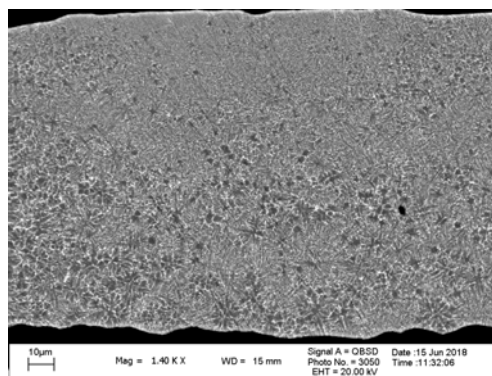
В последнее время для направленного модифицирования структуры и свойств используются сильно неравновесные условия кристаллизации, к которым относится высокоскоростное охлаждение расплава (СБЗР). В этом методе при растекании тонкого слоя жидкости по поверхности затвердевание начинается в условиях сильного начального переохлаждения и осуществляется с высокой скоростью движения границы раздела жидкой и твердой фаз. Это приводит к образованию мелкозернистых сплавов на основе пересыщенных твердых растворов и позволяет создавать материалы в виде фольг со структурой и свойствами, недостижимыми при традиционных методах получения [1, 2].

Высокоскоростное затвердевание доэвтектических силуминов, содержащих 7,1 ат. % Si, осуществлялось при использовании метода (СБЗР). В этом методе капля расплава исходного состава выливалась на внутреннюю полированную медную поверхность вращающегося барабана (кристаллизатора). Расплав растекался тонким слоем по поверхности кристаллизатора и застывал в виде фольги толщиной 60-80 мкм. Толщина фольги зависит от скорости вращения кристаллизатора и состава сплава. Для сравнения представлены результаты исследования массивных образцов доэвтектических силуминов того же состава синтезированных при затвердевании расплава в графитовой изложнице и его охлаждения со скоростью  $10^2$  К/с.

На рисунке 1 приведены микроструктуры массивных образцов и быстрозатвердевших фольг.



а



б

Рисунок 1 – Микроструктура массивных образцов (а) и быстрозатвердевших фольг (б)

Исследования распределения элементов в массивном образце и фольги показали, что затвердевание массивного образца протекает с образованием дендритов первичного твердого раствора на основе алюминия, при этом происходит отгеснение к границам дендритов атомов кремния и атомов примесей. По границам дендритов формируется слой толщиной в 10-20 мкм, состоящий из пластин алюминия и кремния, средний размер которых равен 3-5 мкм (рис. 2а). Содержащиеся в расплаве атомы примеси железа затвердевают в виде крупных пластин (на микрофотографии белые включения), длиной в несколько десятков микрон. Крупные протяженные включения являются концентраторами напряжений при воздействии нагрузки, что отрицательно влияет на механические свойства материала.

Анализ микроструктуры быстрозатвердевших фольг показал, что в основном объеме фольги кремний выделяется в виде тонкого слоя по границам ячеек и дендритов твердого раствора на основе алюминия, размеры которых  $\approx 400$  нм и 1-2 мкм, соответственно

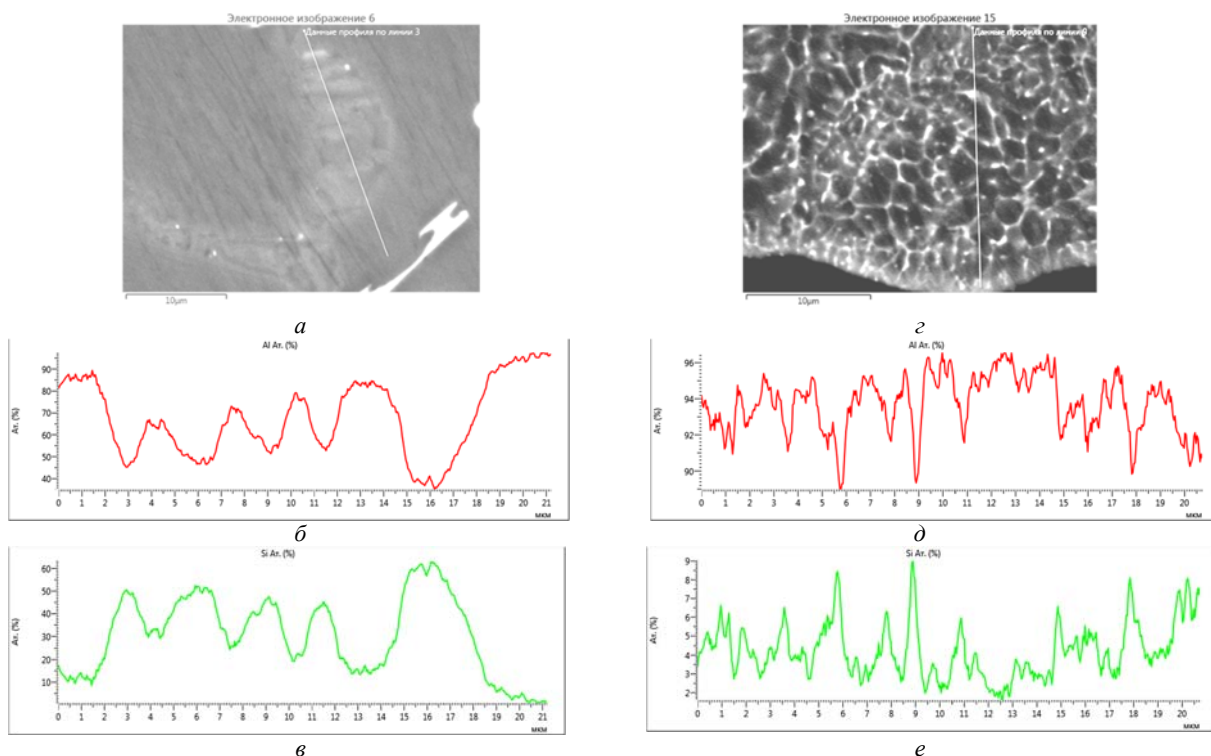


Рисунок 2 – Микроструктура и распределение элементов в массивном образце (а, б, в) и быстрозатвердевшей фольги сплава Al-7,1 ат. %Si

У стороны фольги, прилегающей к кристаллизатору наблюдается образование равномерно расположенных наноразмерных частиц кремния и фаз различных соединений на основе легирующих элементов. По мере уменьшения переохлаждения последовательно формируются слой ячеек и слой дендритов с постепенно увеличивающимся средним размером от нескольких сот нанометров до полутора-двух микрон. Укрупнение структурных составляющих у поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору, обусловлено более глубоким переохлаждением расплава, которое частично снимается за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации. Элементный состав фольг доэвтектического сплава Al-7,1 ат. % Si при этом не изменяется.

Методом рентгеноспектрального микроанализа проводилось исследование элементного состава со стороны фольги, прилегающей к кристаллизатору (А) и со свободно затвердевающей стороны (В). При ускоряющем напряжении

20 кэВ толщина исследованного слоя оценивается равной ~ 3,5 мкм.

Таблица 1 – Элементный состав с двух сторон быстрозатвердевшей фольги

| Сторона фольги | Концентрация элементов, ат. % |     |     |     |     |
|----------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                | Al                            | Si  | Fe  | Mn  | Ni  |
| А              | 92,4                          | 7,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| В              | 92,5                          | 7,0 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |

Таким образом, высокоскоростное затверждение доэвтектических силуминов Al-7 ат.%Si, обеспечивает ультрадисперсную микроструктуру, отсутствие крупных включений примесей и постоянство элементного состава по толщине.

### Литература

1. Васильев В.А., Митин Б.С., Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технологии и материалы) / Под ред. Б.С. Митина. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 1998. – 400 с.
2. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.

УДК 615.8-7

## РАЗРАБОТКА АППАРАТА ДЛЯ МАГНИТОУЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРАПИИ

Дедович Н.Н., Романов А.Ф.

НИИ прикладных физических проблем им.А.Н.Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь

В последние годы в медицинскую практику активно внедряются различные сочетанные физиотерапевтические методы, такие как фотоманитотерапия, электрофонотерапия и другие [1], когда на пациента одновременно воздействует

несколько лечебных факторов. Особенно перспективны сочетанные физиотерапевтические методы, позволяющие взаимно потенцировать действие сочетаемых физических факторов, сокращать время процедуры и уменьшать другие ее дозиметриче-

ские параметры. Принято считать, что усиление физиологических и лечебных эффектов наблюдается тогда, когда в одной процедуре используются физические факторы, близкие по механизму действия и схожие по направленности их влияния на важнейшие системы организма и типовые патологические процессы. Анализ литературных данных показывает, что ультразвук и магнитные поля во многом отвечают этому требованию, а, следовательно, совместное использование ультразвука и магнитного поля представляется перспективным [2]. Для практической реализации метода магнитоультразвуковой терапии (фономагнитотерапии) был разработан терапевтический аппарат, позволяющий проводить одновременное воздействие двумя лечебными факторами с постоянным контролем уровня излучающих воздействий.

Медицинский аппарат для фономагнитотерапии укрупнено можно представить в виде комплекса, состоящего из трех блоков: 1 – электронных узлов, предназначенных для возбуждения акустических (ультразвуковых) колебаний; 2 – электронных узлов, формирующих электрические токи и напряжения различной формы и длительности для индуктора, осуществляющего непосредственное преобразование электрических колебаний в энергию магнитного поля; 3 – общие узлы управления, задания режимов работы аппарата и визуализации прохождения процедуры (рисунок 1).

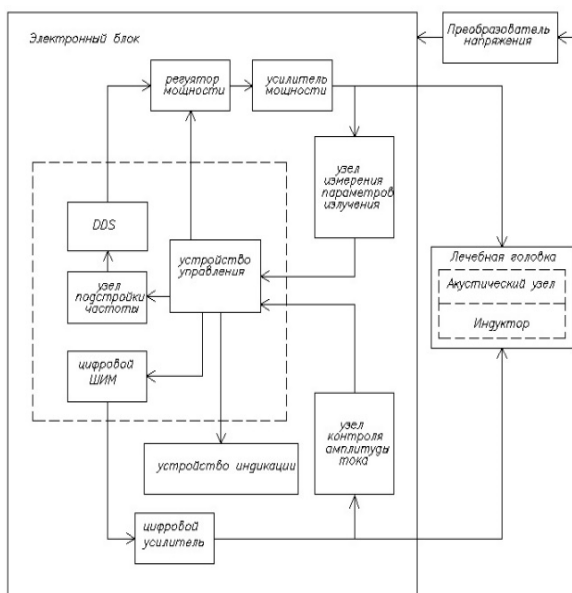


Рисунок 1 – Блок-схема аппарата

Реализация электронных узлов для возбуждения акустического и магнитного воздействий представляет собой две самостоятельные задачи, которые могут решаться независимо с последующей их взаимной синхронизацией при проведении процедур с помощью общего блока управления. Такая структура аппарата позволяет обеспечить как проведение комплексного (одновременного) воздействия на пациента акустическим и магнит-

ным полем, так и использование аппарата для проведения терапевтических процедур независимо по каждому воздействию, т. е. как два отдельных терапевтических аппарата.

Большая часть функциональных узлов аппарата реализована в цифровом виде на базе программируемой логической схемы (ПЛИС). Реализация узлов аппарата с использованием цифровых интегральных схем позволяет увеличить надежность и стабильность аппарата по сравнению с аналоговым подходом. Применение ПЛИС для реализации функций аппарата в цифровом виде позволяет увеличить гибкость решений и снизить затраты на модернизацию и сопровождение. В качестве ПЛИС используется семейство MAX10 фирмы Altera. Данное семейство ПЛИС обладает достаточным количеством элементарных логических элементов, высокой скоростью работы и, кроме того, имеет встроенный блок аналогово-цифрового преобразования (АЦП).

Для возбуждения магнитной части излучателя служит узел формирования формы и частоты тока, выполненный с использованием широтно-импульсной модуляции, т. е. подводимая к нагрузке мощность, регулируется изменением скважности импульсов, при постоянной их частоте.

Для контроля подаваемого напряжения в преобразователях портативных устройств, имеющих малые габариты и требующие высокой эффективности применение цифровой широтно-импульсной модуляции (ЦШИМ) имеет неоспоримые преимущества, такие как перепрограммируемый характер, нечувствительность к изменениям температуры, линейность, высокую скорость перестройки, минимизированную задержку и лучшую производительность.

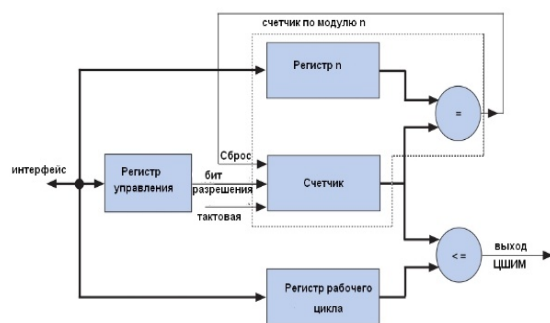


Рисунок 2 – Схема ЦШИМ-генератора

Логика работы ЦШИМ-генератора представлена на рисунке 2. Входной тактовый сигнал управляет 32-битным модульным счетчиком по модулю n, который определяет период сигнала на выходе ЦШИМ. 32-разрядный компаратор сравнивает текущее значение счетчика со значением рабочего цикла и определяет состояние выхода. Если текущее значение счетчика меньше или равно рабочему циклу, выход ЦШИМ имеет значение 0, в противном случае на выходе значение 1.

Сигнал на выходе ЦШИМ затем интегрируется для получения аналогового напряжения.

При использовании простого пассивного RC-фильтра частота интегратора должна быть как минимум на порядок ниже частоты ЦШИМ.

Для возбуждения ультразвуковой части излучателя служит регулируемый задающий генератор, который реализуется в ПЛИС с помощью схемы прямого цифрового синтеза (DDS). Характерной особенностью DDS является то, что отсчеты синтезируемого сигнала вычисляются цифровыми методами, после чего передаются на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), где и происходит их преобразование в аналоговую форму (напряжение или ток), как это показано на рисунке 3.

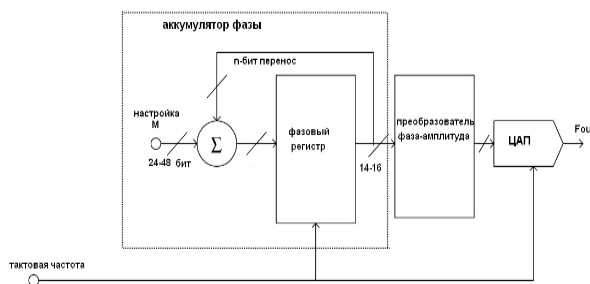


Рисунок 3 – Схема прямого цифрового синтеза

Одной из важных особенностей таких устройств является высокая разрешающая способность задания значений воспроизводимых частот и их большая точность. Скорость (время) перестройки выходной частоты с одного значения на другое очень высока и стабильна. Время перестройки не зависит от разности между начальной и конечной частотами.

С выхода ЦАП сигнал поступает на усилитель мощности. Нагрузкой усилителя мощности является ультразвуковая часть комбинированного излучателя. Для регулировки излучаемой мощности на входе усилителя установлен цифровой потенциометр, управляющий коэффициентом деления сигнала, поступающего на вход усилителя мощности.

Для контроля магнитного потока, протекающего через индуктор, используется датчик Холла, который крепится на индукторе и выход датчика через схему согласования подключается

к входу АЦП ПЛИС. Поскольку датчик преобразует значение амплитуды магнитного потока, протекающего через датчик в амплитуду электрического сигнала, то, кроме контроля тока протекающего через индуктор, этот способ позволяет дополнительно контролировать способность индуктора преобразовывать электрический сигнал в магнитный поток, т. е. контролировать воздействие магнитным полем.

Узел измерения параметров ультразвукового излучения частично реализован в ПЛИС. Для подстройки частоты сигнала, поступающего на пьезокерамический излучатель, в резонанс проводится измерение фазы напряжения и тока, протекающего через излучатель. Сравнение фаз тока и напряжения происходит в ПЛИС с помощью фазового детектора. Фазовый детектор, срабатывающий по фронтам входных сигналов, формирует управляющие импульсы, которые через схему суммирования (вычитания) поступают на вход DDS для коррекции частоты сигнала возбуждения. Для контроля акустического контакта сигнал с выхода измерителя тока подается на вход АЦП ПЛИС.

Устройство управления аппарата реализовано программно с помощью ПЛИС, для чего используется специально разработанная для ПЛИС фирмы Altera Nios2 - 32-разрядная микропроцессорная архитектура –soft-микро-процессор– микропроцессорное ядро, которое полностью создано с использованием только логического синтеза. Достоинством такого решения является снижение количества элементов, требуемых для построения аппарата, и, следовательно, снижение его стоимости.

### Литература

1. Улащик В.С. Физиотерапия. Новейшие методы и технологии. Минск : Книжный дом, 2013. – 448 с.
2. Улащик В.С. Магнитоультразвуковая терапия: теоретическое обоснование метода // Новости медико-биологических наук. 2016. – Т. 13. – № 2. – С. 172–177.

УДК 666.3/7

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРО- И ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ САМОГЛАЗУРУЮЩИХСЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Алексеенко И.А.<sup>1</sup>, Шеченок А.А.<sup>2</sup>, Колонтаева Т.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Развитие науки о трении и изнашивании твердых тел показало, что в контакте трущихся тел наблюдается их адаптация за счет протекания гаммы физико-химических процессов, при этом создаются специфические поверхност-

ные структуры, реализующие низкий и стабильный коэффициент трения при высокой износостойкости [1]. Актуальным направлением современных исследований является сочетание различных систем, синтез и изучение новых материалов,

полученных на их основе. Основными свойствами износостойких керамических материалов является работа в условиях длительных истирающих нагрузок. Износостойкие детали работают при высоких температурах, резких перепадах температуры и других осложняющих факторах.

Анализ обзора литературы в области синтеза износостойких керамических материалов показал, что основными сырьевыми компонентами являются оксиды алюминия и стабилизированного циркония [2–3]. Полученные керамические материалы характеризуются мелкокристаллической плотной структурой и повышенными прочностными показателями (300–550 МПа) при температуре спекания 1500–1700 °С. Эти материалы при всех достоинствах имеют высокую себестоимость из-за дорогостоящих исходных компонентов, повышенной температуры обжига.

С целью снижения коэффициента трения износостойких изделий в ряде случаев используется эффект самоглазурирования поверхности при синтезе керамики, где в качестве сырьевых компонентов могут быть использованы перлиты, цеолиты и вулканические стекла с добавками щелочесодержащих компонентов таких, как сода, фторид и фосфат натрия [4–5]. Получение износостойких материалов с самоглазурирующей поверхностью на основе доступного минерального сырья является актуальной проблемой.

В этой связи основной целью работы является установление особенностей структуро- и фазообразования, а также поведение исходных сырьевых композиций при термической обработке при получении керамических износостойких самоглазурирующихся материалов на основе системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .

Синтез керамических материалов проводился в поле кристаллизации анортита указанной системы с использованием как химических реактивов, так и природного сырья (мела, огнеупорной глины, кварцевого песка). Для образования самоглазурирующей поверхности в сырьевую смесь вводились растворимые щелочесодержащие добавки [6].

Дифференциально-сканирующая калориметрия, позволяющая установить процессы при нагревании сырьевых составляющих керамических масс, обусловленная химическим составом и структурой каждого компонента, осуществлялась на приборе DSC 404 F1 Pegasus фирмы Netzsch (Германия). Кривая ДСК для оптимального состава с использованием природного сырья и щелочных добавок свидетельствует о наличии ряда термических эффектов.

Из рисунка 1 следует, что первый слабый эндотермический эффект при температуре 108,1 °С связан с удалением физически связанной влаги. При температуре 484,2 °С происходит дегидратация NaOH, при 574,2 °С наблюдается переход низкотемпературного β-кварца в α-кварц, а также

потеря структурной воды глинистой составляющей. Глубокий эндотермический эффект, связанный с разложением карбонатов, наблюдается в интервале температур 780–850 °С с максимумом при 800,1 °С. Экзотермические эффекты при температурах 870,9 °С и 932,4 °С связаны с перестройкой кристаллической решетки глин, формированием новых кристаллических фаз, вероятнее анортитовой природы. С 1100 °С и выше происходит образование расплава и развиваются процессы жидкофазного спекания.

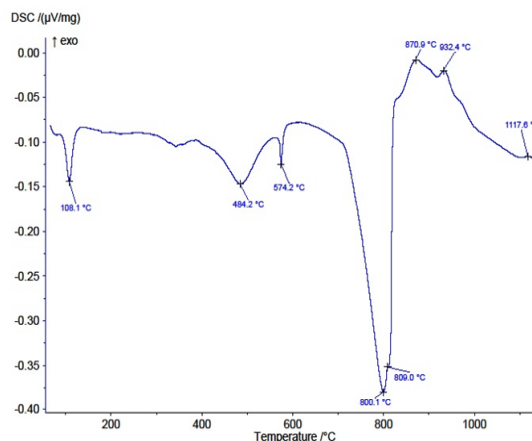
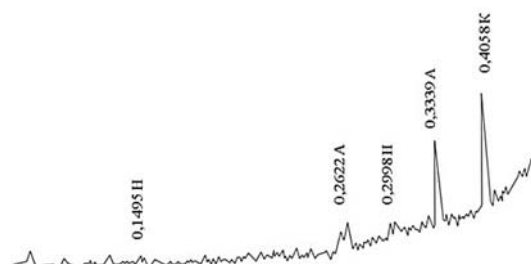


Рисунок 1 – Кривая ДСК керамической массы оптимального состава

Рентгенофазовый анализ синтезированных самоглазурирующихся образцов проводился на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия). В образце кроме основных фаз анортита и кристобалита обнаружен нестехиометрический твердый раствор анортита, образованный в результате взаимодействия анортита с оксидом натрия, вводимого через NaOH (рисунок 2).



Межплоскостные расстояния приведены в нм  
А – анортит; К – кристобалит; Н – натриевый анортит  
Рисунок 2 – Кривая РФА самоглазурированного образца, обожженного 1170 °С

Микроструктура образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа марки JSM-5610 LV, оснащенного системой локального химического анализа EDX JED-2201 JEOL (Япония). Изображения получены с увеличением в 1000 раз (рисунок 3).

Из представленных на рисунке 3 данных видно, что структура керамической матрицы поликристаллическая, текстура неоднородная, представлена зернами различной формы, согласно

рентгенофазовому анализу в основном анортитовой фазы. Структура сформировавшейся во время обжига самоглазурующей поверхности образца более однородная и ровная, хотя имеются небольшое количество пор и включения зерен.

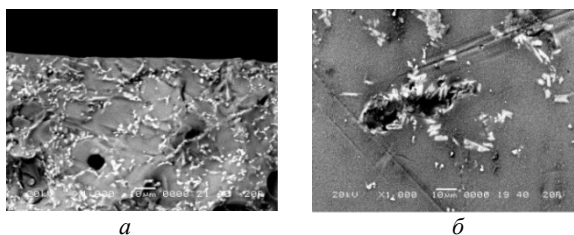


Рисунок 3 – Электронно-микроскопическое изображение: внутреннего скола (а) и самоглазурующей поверхности керамического образца (б), обожженных при температуре 1170 °С

Структура неглазурованного образца имеет шероховатости, которые усиливают трение. Установлено, что щелочная добавка в керамическую массу снижает температуру спекания образца, образует стекловидный слой, выравнивает и «залечивает» поверхности открытых пор, образуя в поровом пространстве скопление мелких кристаллов предположительно анортитовой природы. Использование эффекта самоглазурования позволило получить керамические материалы с шероховатостью поверхности (средним отклонением профиля  $R_a$ ) 3,2 нм, коэффициентом трения 0,24 и микротвердостью 10800 МПа, которые можно рекомендовать для эксплуатации в условиях истирающих нагрузок.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для получения износостойких керамических изделий с пониженным коэффициентом трения, способных работать длительное время в условиях истирающих нагрузок в химиче-

ской и машиностроительной отраслях, а также на предприятиях легкой промышленности.

### Литература

1. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев [Текст] / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М. : Машиностроение, 1991. – 208 с.
2. Современная оксидная керамика и области ее применения [Текст] / Е.С. Лукин, Н.А. Попова, Н.А. Макаров [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 1. – С. 3–13.
3. Алисин, В.В. Влияние химического состава и условий синтеза наноструктурированных кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония на трибологические характеристики [Текст] / В.В. Алисин, М.А. Борик, А.В. Кулебякин, Е.Е. Ломонова // Керамика и композиционные материалы: доклады VI Всероссийской научной конференции, Сыктывкар, 25–28 июня 2007 г. – Сыктывкар, 2007. – С. 349–350.
4. Меркин, А.П. Производство самоглазурующихся керамических плиток [Текст] / А.П. Меркин, Н.А. Николаенко, М.А. Шенкао // Стекло и керамика. – 1991. – № 3. – С. 11–12.
5. Меркин, А.П. Самоглазурующиеся керамические плитки на основе кислых вулканических стекол / А.П. Меркин, В.И. Наназ-швили // Стекло и керамика. – 1987. – № 12. – С. 18–19.
6. Износостойкие керамические материалы с самоглазурующей поверхностью / О.А. Сергеевич, И.А. Алексеенко, Е.М. Дятлова // Международная науч.-техн. конф. молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев, 26–27 октября 2017 г. – С. 104.

УДК 666.766:[666.321+614.842.615]

### ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Дятлова Е.М., Колонтаева Т.В., Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Белугин Д.С, Ильина Л.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь  
Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Современные теплоизоляционные материалы широко используются для тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий, технологического оборудования и различных теплотехнических агрегатов. Теплоизолирующие материалы, применяющиеся в промышленности строительных материалов, позволяют экономить от 20 до 70 % топлива, при этом осуществляется снижение перепада температур в тепловых агрегатах, уменьшение толщины ограждающих конструкций, существенно ускоряется процесс обжига, а также качество обжигаемых изделий.

В керамической технологии применяют несколько методов получения пористой структуры: введение выгорающих добавок, в качестве которых выступают органические компоненты – опилки, торф, уголь, сгорающие при синтезе, образуя поры; использование пенообразования (с применением различных пен) или химического газообразования (металлический алюминий с кислотами или щелочами). Анализ литературных данных показывает, что применение шликерной технологии с использованием пенообразователей позволяет получать изделия, характеризующиеся

высокой пористостью (до 85 %) и равномерной ячеистой структурой, что обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства конструкций.

В настоящее время в Республике Беларусь теплоизоляционные керамические изделия не выпускаются и являются предметом импорта из стран СНГ и ближнего зарубежья. В связи с этим, весьма актуальными являются исследования, направленные на установление возможности и целесообразности применения местного огнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья для получения указанных материалов.

На территории нашей республики отсутствуют месторождения огнеупорных глинистых материалов, разрабатываемые в промышленных масштабах. Однако в настоящее время большой интерес ученых вызывают перспективные месторождения и проявления каолинов на территории Республики Беларусь, в частности месторождение «Дедовка» Житковичского района Гомельской области с общими запасами первичных каолинов 7,02 млн. т и вторичных каолинов 1,23 млн. т. Проведенные нами исследования позволили установить возможность и целесообразность применения природных и обогащенных местных каолинов в керамической промышленности.

Основными недостатками каолина указанного месторождения являются сильная запесоченность, наличие железистых и титансодержащих примесей. Установлено, что мокрое обогащение каолина методом отмучивания до прохождения частиц через сито № 0063 позволяет снизить содержание кварца приблизительно на 20 %, что значительно улучшает пластические и огнеупорные характеристики сырья.

Также для получения теплоизоляционных материалов использовались тугоплавкие глины «Городок» (Гомельская область, РБ) и «Городное» (Брестская область, РБ).

В качестве отощающих добавок при синтезе использовались кварцевый песок Гомельского ГОКа, дегидратированная глина «Городное», гранитоидные отсеvy, шамот алюмосиликатный.

В качестве пенообразователей традиционно применяют поверхностно-активные продукты нефтепереработки и нефтехимического синтеза, а также природные органические вещества (например, канифольное мыло, сапонин), способные образовывать устойчивые во времени пены. В данной работе использовались пенообразователи для пожаротушения с истекшим сроком годности, подлежащие утилизации.

Исследования свойств пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» и пены, полученной на его основе, позволили установить возможности применения для получения тепло- и шумоизоляционных керамических материалов.

Первая серия составов разрабатывалась на основе следующих компонентов: глина «Керамик-Веско» в количестве 10 мас.%, шамот алюмосиликатный 60–80 мас.% и обогащенный каолин «Дедовка» 10–30 мас.%. Составы второй серии получали на основе местного тугоплавкого глинистого сырья месторождений «Городок» или «Городное» с введением отощающих добавок. Содержание глины варьировалось в пределах 30–60 мас.%. Количество вводимого отощителя (кварцевый песок, дегидратированная глина «Городное», гранитоидные отсеvy и алюмосиликатный шамот) составляло 40–70 мас.%.

Опытные образцы теплоизоляционных материалов получали по шликерной технологии. Предварительно подготовленные глинистые компоненты и алюмосиликатный шамот смешивались в необходимых соотношениях, затем добавлялась вода до влажности шликера 40–50 мас.%. Суспензия тщательно перемешивалась до однородности с помощью миксера. Отдельно готовилась пена методом диспергирования пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» в лабораторной мешалке, а затем вводилась в шликер. Для стабилизации пеномассы использовали мездровый клей в количестве 20 мас.% (сверх 100 %).

Дополнительно в полученную суспензию вводили гипсовое вяжущее марки Г-5 в количестве 15 мас.%, а также портландцемент М400 – 15 мас.% (сверх 100 %), добавление которых способствовали упрочнению отлитого полуфабриката и ускорению процессов сушки за счет активного поглощения влаги при гидратации.

Формование полуфабриката осуществлялось методом литья приготовленного шликера в специальные формы, с последующей сушкой и обжигом изделий в интервале температур 1100–1300°C в зависимости от химико-минералогического состава массы.

Рентгенофазовый анализ, проведенный с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (Германия), позволил установить, что фазовый состав синтезированных материалов представлен преимущественно муллитом ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), кварцем ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ) и кристобалитом ( $\text{SiO}_2$ ).

Результаты исследования микроструктуры синтезированных материалов, выполненного на сканирующем электронном микроскопе «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия), представлены на рисунке 1.

Анализ полученных микрофотографий позволил установить, что материал обладает значительной пористостью. Равномерно распределенные по объему материала поры имеют изометричную форму и характеризуются размером от 5 до 1000 мкм. На поверхности изломов фиксируются кристаллические образования в виде призм продолго-

ватой формы, которые, согласно габитусу кристалла, можно идентифицировать как муллит.

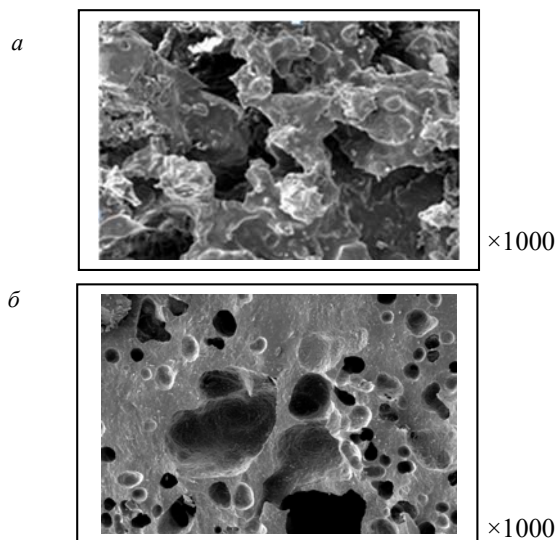


Рисунок 1 – ЭМ-изображение поверхности синтезированных материалов, полученных на основе составов первой серии (а) и второй серии (б)

Скопления кристаллов различной формы и размеров располагаются как на поверхности, так и во внутренних полостях пор и аналогичны для образцов всех исследуемых составов. На некоторых участках четко выделяются зерна шамота с прослойками аморфизированного вещества.

По результатам проведенных комплексных исследований разработаны теплоизоляционные

керамические материалы на основе огнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Беларуси. Сравнительная характеристика физико-химических свойств полученных материалов оптимальных составов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства разработанных теплоизоляционных материалов

| Наименование свойства                  | Теплоизоляционные материалы, полученные на основе составов |              |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------|
|                                        | первой серии                                               | второй серии |
| Пористость общая, %                    | 68                                                         | 73           |
| Плотность кажущаяся, кг/м <sup>3</sup> | 860                                                        | 722          |
| Водопоглощение, %                      | 69                                                         | 76           |
| Прочность при сжатии, МПа              | 2,79                                                       | 2,54         |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,25                                                       | 0,18         |
| Температура эксплуатации, не более, °С | 1300                                                       | 1200         |

Проведенные исследования показали целесообразность применения глинистоогнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Беларуси и утилизируемого пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» для получения ячеистых теплоизоляционных керамических материалов, что позволит расширить сырьевую базу керамической отрасли, ассортимент выпускаемой продукции, решить проблемы импортозамещения, ресурсо- и энергосбережения, а также утилизации пенообразователей для пожаротушения с истекшим сроком годности.

УДК 621.382

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Жевняк О.Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Уменьшение размеров элементов современных интегральных микросхем, в частности, проводящих каналов МОП-транзисторов, приводит к тому, что перенос электронов в них приобретает сильно неоднородный и сильно нелокальный характер (см., например, [1; 2]). Электрические характеристики и связанные с ними электрофизические параметры – дрейфовую скорость и подвижность, – нельзя описать аналитическими или модельными приближениями. Зависимости величин этих параметров становятся существенно двумерными – они изменяются как вдоль проводящих каналов МОП-транзисторов, так и по их глубине.

Целью настоящего доклада явилось рассмотрение распределений подвижности электронов как вдоль проводящего канала в короткоканаль-

ном МОП-транзисторе, так и в глубь его (в подложку) и оценка влияния на эти распределения напряжения на стоке  $V_D$  и глубины залегания истока и стока  $d_j$ . Данные распределения были получены на основании численного моделирования движения электронов в проводящем канале транзистора методом Монте-Карло в соответствии с алгоритмами и процедурами, описанными в наших работах [3; 4].

Моделировался МОП-транзистор со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала  $L_{ch} = 0,2$  мкм, толщина подзатворного окисла  $d_{ox} = 6$  нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока  $N_D = 10^{26}$  м<sup>-3</sup>, концентрация акцепторной примеси в подложке  $N_A = 10^{24}$  м<sup>-3</sup>, напряжение на затворе  $V_G = 2$  В. Напряжение на стоке  $V_D$  изменялось от 1



до 3 В, глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку  $d_j$  равнялось 10, 50 и 100 нм (т. е. рассматривались три модельных МОП-транзистора с разной глубиной залегания данных областей и равными прочими параметрами).

На рис. 1–3 приведены полученные в результате моделирования распределения рассчитанных значений подвижности в разных продольных сечениях канала, расположенных на разной глубине в подложке, т. е. разным расстоянии от поверхности раздела оксид кремния/кремний: рис. 1 для трех в глубину подложки на расстоянии  $z_1 \approx 6$  нм (непрерывные линии),  $z_2 \approx 20$  нм (штриховые линии) и  $z_3 \approx 35$  нм (пунктирные линии), рис. 2 и 3 для двух в глубину подложки на расстоянии  $z_1 \approx 6$  нм (непрерывные линии) и  $z_2 \approx 20$  нм (штриховые линии).

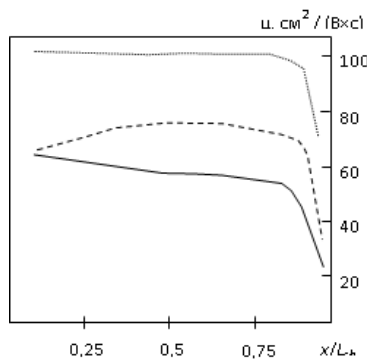


Рисунок 1 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов в разных его сечениях

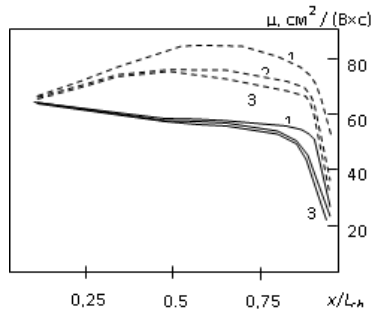


Рисунок 2 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов для разных значений напряжения на стоке: 1 –  $V_D = 1$  В; 2 –  $V_D = 2$  В; 3 –  $V_D = 3$  В;  $d_j = 50$  нм.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о существенной неоднородности распределений величины подвижности электронов вдоль проводящего канала в различных его сечениях в глубину подложки для рассмотренных условий. Средняя величина подвижности при удалении электронов от поверхности раздела оксид кремния/кремний заметно увеличивается. Для глубин  $z_1 \approx 6$  нм и  $z_3 \approx 35$  нм увеличение почти двукратное – от 50–55  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$  до 100  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$ . Данное различие можно объяс-

нить, с одной стороны, существенной неоднородностью величины напряженности электрического поля в проводящем канале короткоканального МОП-транзистора в различных его сечениях в глубину подложки, а, с другой стороны, относительно большой длиной свободного пробега электронов по сравнению с характерными длинами, на которых в МОП-транзисторе возникают высокие значения напряженности электрического поля. Вблизи границы раздела оксид кремния/кремний эти значения наблюдаются на заметно больших размерах, нежели в глубине подложки. Но электроны, разогреваясь у поверхности раздела, массово перемещаются в глубину подложки, где в целом напряженности электрического поля заметно меньше (только в очень узкой области вблизи стока они стремительно возрастают), что и способствует повышению значений подвижности электронов в глубине подложки – энергия электронов здесь довольно высока, а напряженность поля сравнительно не велика.

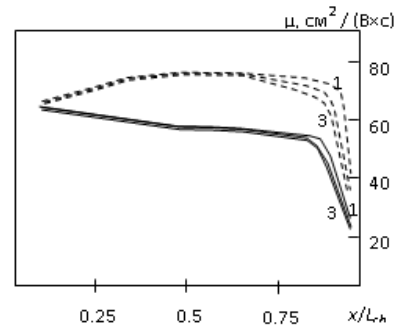


Рисунок 3 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов для разных значений глубины залегания стока: 1 –  $d_j = 10$  нм; 2 –  $d_j = 50$  нм; 3 –  $d_j = 100$  нм;  $V_D = 2$  В

Из поведения кривых на рис. 2 и 3 можно получить оценку влияния на неоднородность распределений подвижности электронов напряжения на стоке и глубины залегания истоковой и стоковой областей. Как видно из рис. 2 на начальной половине канала это влияние фактически отсутствует. Значит можно утверждать, что для рассмотренных условий поле стока на начальную половину канала не проникает. На второй половине канала увеличение напряжения на стоке заметно уменьшает величину подвижности электронов. При этом практически исчезает неоднородность по глубине в подложку – значения подвижности отличаются на незначительную величину и равняются 25–20  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$ .

Аналогичное влияние на неоднородность распределений подвижности оказывает и величина глубины залегания истоковой и стоковой областей. Для рассмотренных условий оно наблюдается только в узкой области проводящего канала вблизи стока (на расстоянии от стока не более четверти длины канала). С увеличением глубины залегания значения подвижности электронов

уменьшаются на указанном участке по сравнению с остальными участками более чем в два раза.

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло изучены двумерные распределения подвижности электронов в проводящем канале короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов. Показана сильная неоднородность этих распределений по глубине канала в направлении подложки транзистора. Изучено влияние на эти распределения напряжения на стоке и глубины залегания истоковой и стоковой областей. Установлено, что это влияние существенно на участке канала вблизи стока, где наблюдаются очень высокие значения напряженности тянущего электрического поля.

УДК 621.793

### МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr-Ni

Захаров И.А.<sup>1</sup>, Касьяник А.В.<sup>1</sup>, Хомич Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УП «Полимаг», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

#### Введение

Эффективная работа атомных реакторов и их безопасность непосредственно зависят от качества циркониевых компонентов тепловыделяющих сборок, в частности – оболочек твэлов.

Применяемая в настоящее время финишная механическая обработка (шлифование и полирование) труб-оболочек приводит к образованию в приповерхностном слое большого количества дефектов структуры (прижоги, микротрещины и др.), которые являются потенциальными очагами коррозионного и механического разрушения деталей.[1]

Высокое качество поверхности оболочек твэлов может быть обеспечено в процессе их изготовления применением финишной операции магнитно-абразивной обработки (МАО). В результате МАО формируются нанорельеф поверхности и приповерхностный слой с минимумом дефектов структуры. В результате значительно повышаются функциональные свойства твэлов, надежность и эксплуатационная безопасность атомных реакторов.[2, 3]

#### Метод магнитно-абразивной обработки

Суть процесса МАО состоит в том, что ферроабразивный порошок под действием магнитного поля приобретает вид «эластичной щетки» и полирует поверхность изделия. При этом импульсное магнитное поле оказывает определяющее воздействие на особенности формируемой поверхности с шероховатостью наноуровня и дефекты структуры приповерхностного слоя. Это влияние обусловлено физико-химическими явлениями и процессами массо- и теплопереноса на

#### Литература

1. Scaling the MOS Transistor Below 0.1  $\mu\text{m}$ : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna C. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, No 6. – P. 941–951.

2. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – Москва : Техносфера, 2011. – 799 с.

3. Борздов, В.М., Жевняк, О.Г., Комаров, Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники – Минск : БГУ, 2007. – 175 с.

4. Zhevnyak, O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.

атомно-молекулярном уровне, протекающими в присутствии магнитного поля при взаимодействии обрабатываемого материала и компонентов ферроабразивного порошка и применяемых технологических жидкостей.

Операция МАО труб-оболочек твэлов из сплава Zr-Ni производилась ферроабразивным порошком, на основе железа и карбида титана с применением специальных технологических жидкостей.

«Мягкие» режимы МАО, влияние магнитного поля и оптимальные составы порошков и жидкостей позволяют обеспечить комплекс свойств труб-оболочек, отвечающих высоким требованиям эксплуатации атомных реакторов.

#### Результаты магнитно-абразивной обработки

Одним из основных контролируемых параметров при изготовлении твэлов является показатель шероховатости Ra наружной и внутренней поверхностей изделия.

Измерения шероховатости выполнялись с использованием профилометра «MarSurf PS1» (Maht, Германия). Измерения наружного диаметра (Dн) выполнялись с помощью цифрового микрометра МКЦ25 (ООО НПП «ЧИЗ», Россия) с шагом дискретности 0,001 мм и пределом допускаемой погрешности  $\pm 2$  мкм.

Значения размеров Dн образцов представлены в таблице 1.

Значения параметра Ra шероховатости наружной поверхности образцов представлены в таблице 2.

Фотографии микрорельефа поверхности образцов выполнены на микроскопе инвертирован-

ном металлографическом BestScope BS – 6000B и представлены на рисунке 1.

Таблица 1 – Значения размеров Дн образцов

| Длина, мм | Наружный диаметр. |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 9,543             | 9,533 | 9,539 | 9,539 | 9,540 | 9,539 | 9,536 | 9,535 |
| 305       | 9,534             | 9,536 | 9,540 | 9,539 | 9,542 | 9,541 | 9,537 | 9,537 |
|           | 9,539             | 9,539 | 9,538 | 9,540 | 9,539 | 9,538 | 9,541 | 9,538 |

Таблица 2 – Параметры Ra шероховатости поверхности образцов

| № | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | Средний (Ra), мкм |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| 1 | 0,401 | 0,418 | 0,380 | 0,452 | 0,380 | 0,437 | 0,351 | 0,449 | 0,331 | 0,396 | 0,400             |
| 2 | 0,471 | 0,417 | 0,489 | 0,412 | 0,500 | 0,399 | 0,449 | 0,329 | 0,522 | 0,476 | 0,445             |
| 3 | 0,580 | 0,398 | 0,426 | 0,524 | 0,338 | 0,408 | 0,399 | 0,463 | 0,385 | 0,441 | 0,436             |

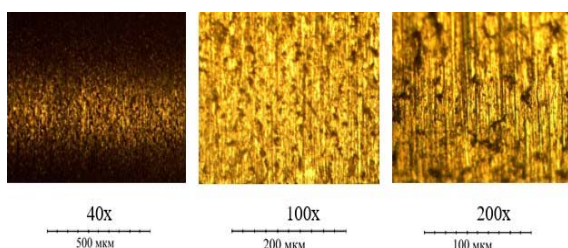


Рисунок 1 – Микрорельеф поверхности твэлов до MAO

При проведении экспериментов использовался порошок Fe+TiC фракций 160/40 и 40/0 мкм.

В таблицах 3 и 4 представлены результаты MAO образцов твэлов.

Таблица 3 – Дн труб до MAO, после 5 и 10 минут MAO соответственно

| Состояние      | Наружный диаметр. |       |       |       |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|
| До обработки   | 9,540             | 9,539 | 9,536 | 9,535 |
| После 5 минут  | 9,509             | 9,478 | 9,492 | 9,518 |
| После 10 минут | 9,505             | 9,456 | 9,452 | 9,495 |

Таблица 4 – Параметр Ra шероховатости поверхности образцов до MAO и после MAO порошками фракций 160/40 и 40/0 мкм соответственно

| Ra, мкм        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | Средний показатель/диапазон |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|
| До             | 0,401 | 0,418 | 0,380 | 0,452 | 0,380 | 0,437 | 0,351 | 0,449 | 0,331 | 0,396 | 0,400/0,331-0,452           |
| 5 минут 160/40 | 0,086 | 0,090 | 0,127 | 0,164 | 0,136 | 0,174 | 0,163 | 0,165 | 0,138 | 0,129 | 0,137/0,086-0,174           |
| 5 минут 40/0   | 0,049 | 0,049 | 0,090 | 0,037 | 0,049 | 0,054 | 0,044 | 0,049 | 0,117 | 0,083 | 0,067/0,037-0,117           |

Фотографии микрорельефа поверхности образцов после MAO порошками фракции 160/40 и

40/0 мкм соответственно представлены на рисунках 2 и 3.

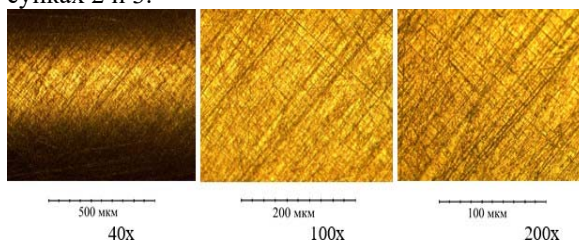


Рисунок 2 – Микрорельеф поверхности твэлов после MAO порошком фракции 160/40 мкм

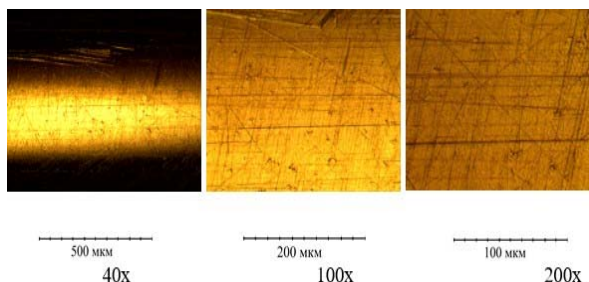


Рисунок 3 – Микрорельеф поверхности твэлов после MAO порошком фракции 40/0 мкм на краю образца

### Заключение

Магнитно-абразивная обработка поверхностей оболочек твэлов обеспечивает снижение параметра шероховатости Ra с 0,33-0,47 мкм до 0,05-0,17 мкм при среднем размерном съеме металла более 30-и мкм на сторону.

Оптимальные параметры MAO и влияние магнитного поля позволяют обеспечить комплекс свойств труб-оболочек, отвечающих высоким требованиям эксплуатации атомных реакторов.

### Литература

1. Модификация поверхности циркониевых компонентов ТВС реакторов на тепловых нейтронах с целью повышения их эксплуатационных свойств / С.В. Иванова [и др.] // Физика и химия обработки материалов, 2009. – № 3. – С. 5–17.

2. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Мн.: БНТУ, 2006. – 218 с.

3. Ivanova S.V., Glagovsky E.M., I.I. Belugin I.I., Khomich M.S., Korogoda O.P., Khazov M.S. / Pilot process development to change surface properties providing the increased stability of LWR zirconium components in normal operation condition and in emergency situations // Reports on International Conference Top Fuel (Zurich, 21.09.2015), pp 414–423.

## ИЗГИБ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

Захарук Ю.В.

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

Современные композитные материалы, имеющие слоистую структуру, обладают высокими удельными характеристиками жесткости и прочности, создаются с заданной ориентацией свойств. Это позволило им выйти на первый план среди конструкционных материалов и получить широкое распространение во многих отраслях техники. Деформирование трёхслойных круговых пластин в случае несжимаемого заполнителя в настоящее время изучено достаточно хорошо. Постановки и методы решения соответствующих краевых и начально-краевых задач приведены в монографии [1]. Деформирование упругих трёхслойных пластин со сжимаемым заполнителем исследовалось в работах [2, 3].

Здесь приведены постановки краевой задачи в усилиях и перемещениях о симметричном изгибе упругопластической круговой трёхслойной пластины со сжимаемым заполнителем. В тонких несущих слоях с толщинами  $h_1, h_2$  приняты гипотезы Кирхгофа. Жесткий сжимаемый заполнитель воспринимает нагрузку в тангенциальном и вертикальном направлениях, нормаль остается прямолинейной и поворачивается на некоторый дополнительный угол  $\psi(r)$ , деформируемость по толщине принимается линейной.

Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Систему координат свяжем со срединной плоскостью заполнителя. Внешняя вертикальная нагрузка не зависит от координаты  $\varphi$ :  $q=q(r)$ . На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев и обжатию заполнителя. Через  $w(r)$  и  $u(r)$  обозначены прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя,  $v(r)$  – функция обжатия заполнителя. Обозначим через  $h_k$  толщину  $k$ -го слоя ( $k=1, 2, 3$  – номер слоя), при этом  $h_3=2c$ .

Продольные и поперечные (прогибы) перемещения в слоях  $u^{(k)}(r, z)$  и  $w^{(k)}(r, z)$  можно выразить через искомые функции соотношениями:

$$u_r^{(1)} = u + c\psi - z(w_{,r} + v_{,r}), \quad w^{(1)}(r, z) = w(r) + v(r),$$

$$(c \leq z \leq c + h);$$

$$u_r^{(2)} = u - c\psi - zw_{,r}, \quad w^{(2)}(r, z) = w(r),$$

$$(-c - h \leq z \leq -c);$$

$$u_r^{(3)} = u + z\psi - z\left[w_{,r} + \frac{v_{,r}}{2c}(z+c)\right],$$

$$w^{(3)}(r, z) = w(r) + \frac{v(r)}{2c}(z+c), \quad (-c \leq z \leq c);$$

где  $z$  – расстояние от рассматриваемого волокна до срединной поверхности заполнителя; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Деформации в слоях будут

$$\varepsilon_r^{(1)} = u_{,r} + c\psi_{,r} - z(w_{,rr} + v_{,rr}),$$

$$\varepsilon_\varphi^{(1)} = \frac{1}{r}(u + c\psi - z(w_{,r} + v_{,r})), \quad \varepsilon_{rz}^{(1)} = 0,$$

$$\varepsilon_r^{(2)} = u_{,r} - c\psi_{,r} - zw_{,rr}, \quad \varepsilon_\varphi^{(2)} = \frac{1}{r}(u - c\psi - zw_{,r}),$$

$$\varepsilon_{rz}^{(2)} = 0, \quad \varepsilon_r^{(3)} = u_{,r} + z\psi_{,r} - z\left[w_{,rr} + \frac{v_{,r}}{2c}(z+c)\right],$$

$$\varepsilon_\varphi^{(3)} = \frac{1}{r}\left\{u + z\psi - z\left[w_{,r} + \frac{v_{,r}}{2c}(z+c)\right]\right\},$$

$$\varepsilon_{rz}^{(3)} = \frac{1}{2}\left(\psi - \frac{z}{2c}v_{,r}\right), \quad \varepsilon_z^{(3)} = \frac{v}{2c}.$$

Предположим, что материалы несущих слоев в процессе деформирования могут проявлять упругопластические свойства, заполнитель – нелинейно упругие. Для их описания используем соотношения теории малых упругопластических деформаций:

$$s_\alpha^{(k)} = 2G_k(1 - \omega_k(\varepsilon_u^{(k)}))\vartheta_\alpha^{(k)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k\varepsilon^{(k)},$$

$$s_{rz}^{(3)} = 2G_3\vartheta_{rz}^{(3)}(1 - \omega_3(\varepsilon_u^{(3)})), \quad (k=1, 2, 3, \alpha=r, \varphi),$$

где  $s_\alpha^{(k)}, \vartheta_\alpha^{(k)}, \sigma^{(k)}, \varepsilon^{(k)}$  – девиаторные и шаровые части тензоров напряжений и деформаций;  $G_k, K_k$  – модули сдвиговой и объёмной деформации  $k$ -го слоя;  $\omega_k(\varepsilon_u^{(k)})$  – функции пластичности материалов несущих слоев, которые в случае  $\varepsilon_u^{(k)} \leq \varepsilon_y^{(k)}$  следует положить равными нулю;  $\varepsilon_u^{(k)}$  – интенсивность деформаций в  $k$ -м слое ( $k=1, 2$ ),  $\varepsilon_y^{(k)}$  – деформационный предел текучести материалов несущих слоёв;  $s_{rz}^{(3)}, \vartheta_{rz}^{(3)}$  – касательное напряжение и угловая деформация в заполнителе;  $\omega_3(\varepsilon_u^{(3)})$  – универсальная функция, описывающая физическую нелинейность заполнителя, причём  $\omega_3 \equiv 0$  при  $\varepsilon_u^{(3)} \leq \varepsilon_s^{(3)}$ ;  $\varepsilon_s^{(3)}$  – предел физической нелинейности материала заполнителя.

Используя компоненты тензора напряжений  $\sigma_\alpha^{(k)}(\alpha=r, \varphi)$ , введем обобщенные внутренние силы и моменты в пластине:

$$T_\alpha^{(k)} \equiv \sum_{k=1}^3 T_\alpha^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_\alpha^{(k)} dz, \quad M_\alpha \equiv \sum_{k=1}^3 M_\alpha^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_\alpha^{(k)} z dz$$

$$, H_\alpha = M_\alpha^{(3)} + c(T_\alpha^{(1)} - T_\alpha^{(2)}),$$

$$D_\alpha = S_\alpha^{(3)} + c(M_\alpha^{(1)} + M_\alpha^{(2)}), \quad S_\alpha^{(3)} = \int_{h_3} \sigma_\alpha^{(3)} z^2 dz.$$

Компоненты тензора напряжений в слоях представим через девиаторную и шаровую части тензора деформаций, выделив упругие (индекс «e») и неупругие (индекс «w») слагаемые:

$$\sigma_\alpha^{(k)} = \sigma_{ae}^{(k)} - \sigma_{aw}^{(k)}, \quad (\alpha = r, \varphi; k = 1, 2, 3),$$

$$\sigma_z^{(3)} = \sigma_{ze}^{(3)} - \sigma_{zw}^{(3)}, \quad \sigma_{rz}^{(3)} = \sigma_{rze}^{(3)} - \sigma_{rzw}^{(3)},$$

где

$$\sigma_{ae}^{(k)} = 2G_k \varepsilon_\alpha^{(k)} + K_k \theta^{(k)}, \quad \sigma_{aw}^{(k)} = 2G_k \omega_k \varepsilon_\alpha^{(k)},$$

$$\sigma_z^{(3)} = 2G_3 \varepsilon_z^{(3)} + K_3 \theta^{(3)}, \quad \sigma_{z\omega}^{(3)} = 2G_3 \omega_3 \varepsilon_z^{(3)},$$

$$\sigma_{rze}^{(3)} = 2G_3 \varepsilon_{rz}^{(3)}, \quad \sigma_{rzw}^{(3)} = 2G_3 \omega_3 \varepsilon_{rz}^{(3)}.$$

Обобщённые внутренние усилия, с учётом замены напряжения  $\sigma_\alpha^{(k)}$ ,  $\sigma_z^{(3)}$ ,  $\sigma_z^{(3)}$  соответственно на  $\sigma_{ae}^{(k)}$ ,  $\sigma_{aw}^{(k)}$ ,  $\sigma_{rze}^{(3)}$ ,  $\sigma_{rzw}^{(3)}$ ,  $\sigma_{ze}^{(3)}$ ,  $\sigma_{z\omega}^{(3)}$  будут следующими:

$$T_\alpha = T_{ae} - T_{aw} \equiv \sum_{k=1}^3 T_{ae}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 T_{aw}^{(k)},$$

$$M_\alpha = M_{ae} - M_{aw} \equiv \sum_{k=1}^3 M_{ae}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 M_{aw}^{(k)},$$

$$H_\alpha = H_{ae} - H_{aw}, \quad H_{ae} = M_{ae}^{(3)} + c(T_{ae}^{(1)} - T_{ae}^{(2)}),$$

$$H_{aw} = M_{aw}^{(3)} + c(T_{aw}^{(1)} - T_{aw}^{(2)}),$$

$$D_\alpha = D_{ae} - D_{aw}, \quad D_{ae} = M_{ae}^{(1)} + \frac{1}{2} M_{ae}^{(3)} + \frac{1}{2c} S_{ae}^{(3)},$$

$$D_{aw} = M_{aw}^{(1)} + \frac{1}{2} M_{aw}^{(3)} + \frac{1}{2c} S_{aw}^{(3)}.$$

Система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая деформирование круговой упругой трехслойной пластины с жестким сжимаемым наполнителем, была получена с помощью принципа Лагранжа в [2]. Ее можно применить здесь как исходную. Выделяя в обобщенных внутренних усилиях линейные и нелинейные составляющие, получим:

$$T_{r,r} + \frac{1}{r}(T_r - T_\varphi) = p_\omega,$$

$$H_{r,r} + \frac{1}{r}(H_r - H_\varphi) - Q^{(3)} = h_\omega,$$

$$M_{r,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r,r} - M_{\varphi,r}) = -q + q_\omega,$$

$$D_{r,rr} + \frac{1}{r} \left( 2D_{r,r} - D_{\varphi,r} - \frac{1}{2c} M_{rz}^{(3)} \right) -$$

$$-\frac{1}{2c} T_z^{(3)} - \frac{1}{2c} M_{rz}^{(3)},r = -q + g_\omega.$$

Здесь в левой части уравнений собраны линейные составляющие обобщенных внутренних усилий, причем нижний индекс «e» в дальнейшем опущен для удобства. Нелинейные добавки сосредоточены справа и включены в слагаемое с нижним индексом «w»:

$$p_\omega = T_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(T_{r\omega} - T_{\varphi\omega}),$$

$$h_\omega = H_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(H_{r\omega} - H_{\varphi\omega}) - Q_\omega^{(3)},$$

$$q_\omega = M_{r\omega,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r\omega,r} - M_{\varphi\omega,r}),$$

$$g_\omega = D_{r\omega,rr} + \frac{1}{r} \left( 2D_{r\omega,r} - D_{\varphi\omega,r} - \frac{1}{2c} M_{rz\omega}^{(3)} \right) -$$

$$-\frac{1}{2c} T_{z\omega}^{(3)} - \frac{1}{2c} M_{rz\omega}^{(3)}.$$

Граничные условия в усилиях:

$$T_r = T_r^0 + T_{r\omega}, \quad H_r = H_r^0 + H_{r\omega}, \quad M_r = M_r^0 + M_{r\omega},$$

$$M_{r,r} + \frac{1}{r}(M_r - M_\varphi) = Q^0 + M_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(M_{r\omega} - M_{\varphi\omega}),$$

$$D_r = D_r^0 + D_{r\omega}, \quad D_{r,r} + \frac{1}{r}(D_r - D_\varphi) - M_{rz}^{(3)} =$$

$$= M_{rz}^0 + D_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(D_{r\omega} - D_\varphi) - M_{rz\omega}^{(3)}.$$

Линейные (упругие) составляющие обобщенных внутренних усилий по-прежнему выражаются через перемещения по формулам, приведенным в [2], поэтому система дифференциальных уравнений равновесия будет иметь вид:

$$L_2(a_1 u + a_2 \psi - a_3 w_{,r} - a_4 v_{,r}) + K_3^- v_{,r} = p_\omega,$$

$$L_2(a_2 u + a_5 \psi - a_6 w_{,r} - a_7 v_{,r}) - 2c G_3 \psi = h_\omega,$$

$$L_3(a_4 u + a_7 \psi - a_9 w_{,r} - a_{10} v_{,r}) - K_3^- \left( u_{,r} + \frac{u}{r} \right) +$$

$$+ \frac{c}{6} \left( 2K_3 - \frac{1}{3} G_3 \right) \left( v_{,rr} + \frac{v_{,r}}{r} \right) - \frac{1}{2c} K_3^+ v = -q + g_\omega,$$

$a_i$  – коэффициенты, учитывающие упругие и геометрические параметры слоев,  $L_k$  – линейные дифференциальные операторы [2].

Краевая задача по определению прогиба круглой упругопластической пластины со сжимаемым наполнителем замыкается присоединением граничных условий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (проект № T18P-090).*

### Литература

1. Плескачевский, Ю.М. Деформирование металлполимерных систем / Ю.М. Плескачевский, Э.И. Старовойтов, А.В. Яровая – Минск : Бел. наука, 2004. – 342 с.

2. Захарчук, Ю.В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации, 2017. – Вып. 10. – С. 55–66.

3. Захарчук, Ю.В. Деформирование круговой трехслойной пластины с легким сжимаемым наполнителем / Ю.В. Захарчук // Теоретическая и прикладная механика, Минск : БНТУ. – 2018. – № 33. – С. 363–369.

УДК 621.383.51

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ $\text{CuInSe}_2$ Есман А.К., Зыков Г.Л., Потачиц В.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

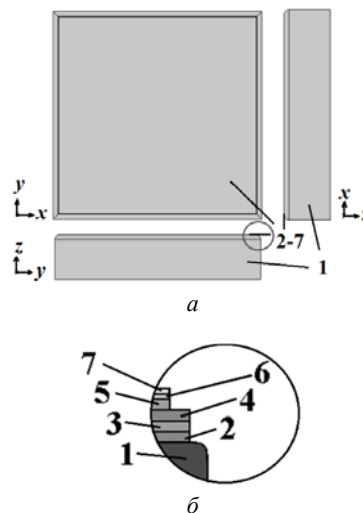
По количеству световой энергии, поступающей на поверхность, Беларусь находится на одном уровне с Германией, Японией, Канадой, где солнечная энергетика развивается очень активно. В настоящее время более 90 % всей потребляемой человеком энергии приходится на долю органического топлива. Понятно, что рано или поздно этот ресурс окончится. Следовательно, использование возобновляемых источников энергии не теряет своей актуальности [1].

Практически безграничными ресурсами обладает солнечная энергия. Несмотря на высокие достижения солнечных батарей на кристаллических модулях, по мнению специалистов, занимающихся в этой области, будущее все-таки за тонкопленочной технологией. Главное достоинство, способное обеспечить ей лидирующие позиции, это более низкая себестоимость [2].

Целью данной работы является поиск новых путей, позволяющих повысить КПД тонкопленочных полупроводниковых солнечных элементов на основе  $\text{CuInSe}_2$ .

Предлагаемый нами солнечный элемент на основе  $\text{CuInSe}_2$  [3] содержит два электродных слоя 2 и 4, разделенных термоэлектрическим слоем на основе  $\text{CuInSe}_2$  3, фотоэлектрический преобразователь, состоящий из слоев  $\text{CuInSe}_2$  5 и  $\text{CdS}$  6, а также прозрачный электрод 7, электрически соединенные и последовательно расположенные на полированной лицевой поверхности подложки 1, изготовленной из нержавеющей стали. Прозрачный электрод 7, выполненный из  $\text{ZnO}$ , пропускает входное солнечное излучение, видимая часть которого поглощается в слоях 5, 6 фотоэлектрического преобразователя, генерирующего электрические заряды, а инфракрасная часть – нагревает его. Одна часть зарядов, сгенерированных в слое 5, разделяется электрическим полем  $p-n$  перехода фотоэлектрического преобразователя, создавая между прозрачным электродом 7 и вторым электродным слоем 4 фото-ЭДС. В то время как оставшаяся часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует и тем самым способствует нагреванию фотоэлектрического преобразователя. Поэтому, между первым 2 и вторым 4 электродными слоями образуется градиент температур, вызывающий появление термо-ЭДС между верхней и нижней сторонами термоэлектрического слоя 3. В результате этого между первым электродным слоем 2, электрически соединенным с нижней стороной термоэлектрического слоя 3, и прозрачным электродом 7 возникает выходное напряжение солнечного элемента, состоящее из фото- и термо-ЭДС. Так как эффек-

тивность работы солнечного элемента зависит от температуры, то необходимо стабилизировать температуру фотоэлектрического преобразователя, поддерживая его коэффициент полезного действия на постоянном уровне.



1 – подложка, 2 – первый электродный слой, 3 – термоэлектрический слой, 4 – второй электродный слой, 5, 6 – фотоэлектрический преобразователь, 7 – прозрачный электрод

Рисунок 1 – Структура солнечного элемента на основе  $\text{CuInSe}_2$  в плоскостях  $xy$ ,  $xz$ ,  $yz$  и увеличенный его фрагмент в плоскости  $yz$

Моделирование проводилось с помощью программной платформы COMSOL Multiphysics, используемой для решения большинства научных и инженерных задач, основанных на системе дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Для количественной оценки повышения вырабатываемой электроэнергии предложенным тонкопленочным солнечным элементом на основе  $\text{CuInSe}_2$  использовался модуль «Heat Transfer Module» данной программной среды. Этот модуль является специализированным инструментом для моделирования тепловых процессов в элементах электронной техники и энергетике, включая солнечные элементы, работающие в реальных условиях эксплуатации.

Тонкопленочный солнечный элемент в процессе моделирования разбивался на конечные элементы в форме тетраэдров. При расчете плотность сетки для каждого слоя солнечного элемента настраивалась с учетом его геометрической конфигурации.

В разработанной численной трехмерной модели тонкопленочного солнечного элемента рассматривались различные условия его эксплуатации: при наличии и отсутствии теплоизоляции

ции торцов подложки, а так же при наличии и отсутствии стабилизации температуры тыльной стороны подложки. Расчеты выполнялись для географических координат г. Минска с учетом суточного и сезонного изменения, как температуры окружающей среды, так и мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальное значение которой составляло  $500 \text{ кВт/м}^2$  [4] при использовании концентраторов [5].

При моделировании использовались данные о средних минимальной и максимальной месячной температуре воздуха в г. Минске с сайта <http://belmeteo.net>. Температура подложки задавалась как с учетом изменения температуры окружающей среды, так и со стабилизацией на уровнях  $+1 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как показали расчеты, в условиях суточного и сезонного изменения температуры и плотности мощности солнечного излучения происходит неравномерный нагрев как поверхности тонкопленочного солнечного элемента, так и его слоев. В указанных выше условиях поверхность предложенного тонкопленочного солнечного элемента на основе  $\text{CuInSe}_2$  без охлаждения и при отсутствии теплоизоляции торцов подложки может нагреваться до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , что приводит к необратимым повреждениям. Теплоизолировав торцы подложки и стабилизировав температуру тыльной стороны подложки на уровне  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура поверхности тонкопленочного солнечного элемента  $\text{CuInSe}_2$  не превысила значений порядка  $14,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Градиент температуры достигает своего максимального значения  $\sim 17 \times 10^4 \text{ К/м}$  (в июне-июле) на данной границе раздела сначала с юго-восточной стороны около 12 часов 30 минут, а затем – с юго-западной стороны спустя 1,5 часа. С северо-востока и северо-запада градиенты температуры на данной границе раздела равны и составляют соответственно  $\sim 15 \times 10^4 \text{ К/м}$ . Как показали расчеты градиент температуры термоэлектрического слоя в течение года изменяется в пределах от  $\sim 17 \times 10^4 \text{ К/м}$  (в июне-июле) до  $\sim 5 \times 10^4 \text{ К/м}$  (в декабре). При этом амплитуда выходного напряжения, генерируемого термоэлектрическим слоем тонкопленочного солнечного элемента  $\text{CuInSe}_2$  изменяется в пределах от 2,1 мВ (в декабре) до 5,23 мВ (в июне и июле) (рисунок 2).

УДК 620-6

## УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЯ СЛЕПОЧНОГО МАТЕРИАЛА, ПРИМЕНЯЕМОГО В СТОМАТОЛОГИИ

Киселев М.Г., Монич С.Г., Лобан Ю.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Многие материалы, используемые в стоматологии, поставляются как два или более компонентов, которые смешиваются вместе и подвергаются химической реакции, и от этого некото-

Таким образом, выбором рабочей точки на вольт-амперной характеристике предложенного солнечного элемента, за счет использования термоэлектрического слоя, можно получить увеличение его выходной мощности до 5 %. Более того, при стабилизации температуры подложки и наличии концентратора солнечного излучения можно достичь еще более существенного увеличения выходной мощности рассматриваемого солнечного элемента. Следует отметить, что инерционность остывания тонкопленочного солнечного элемента в определенной мере стабилизирует выходное напряжение при переменной облачности.

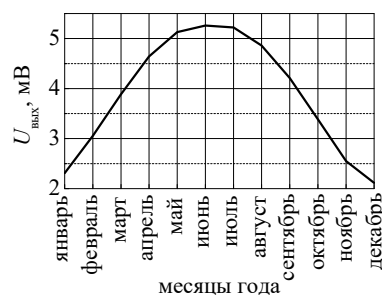


Рисунок 2 – Амплитуда выходного напряжения, генерируемого термоэлектрическим слоем солнечного элемента на основе  $\text{CuInSe}_2$  в течение года

## Литература

1. Khanna, S. Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material / S. Khanna, K.S. Reddy, T.K. Mallick // Solar Energy. – 2018. – Vol. 163. – P. 591–599.
2. Single-graded CIGS with narrow bandgap for tandem solar cells / T. Feurer [et al.] // Science and Technology of Advanced Materials. – 2018. – Vol. 19, no. 1. – P. 263–270.
3. Пат. РБ № 20481 / А.К. Есман [и др.] // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці, 2016. – № 5. – С. 120.
4. Алферов, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников, 2004. – Т. 38, вып. 8. – С. 937–948.
5. A review of solar photovoltaic concentrators / M. Khamooshi [et al.] // International Journal of Photoenergy. – 2014. – V. 2014. – P. 958521-1–17.

рые механические и физические свойства могут резко меняться. Например, многие слепочные материалы, которые начинают смешивать. В таком случае материал может представлять собой

твердое тело или гибкий каучук в зависимости от химической природы продукта. Принятие такого продукта стоматологом зависит от свойств несмешанной пасты, свойств при перемешивании и свойств заданного материала [1].

Большинство используемых материалов в стоматологии имеют минимальное требование к механическим свойствам. Например, некоторые материалы должны быть достаточно прочными и жесткими, чтобы выдерживать силы изгиба без перелома. Другие должны быть достаточно жесткими для поддержания их формы под нагрузкой. Такое свойство материалов, как правило, характеризуется изгибной деформацией, которая легко испытывается с помощью машины, показанной на рисунке 1 [1].

Следует отметить, что пределы растяжения и сжатия, а также сдвиг, являются тремя простыми примерами нагрузки, которые составляют основу всех других более сложных нагрузочных моделей [2–4].

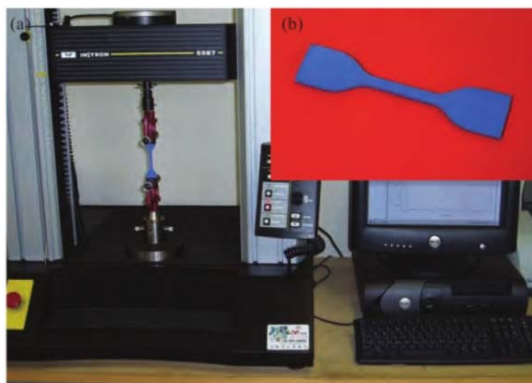


Рисунок 1 – Установка для тестирования механических свойств

Свойства слепочных материалов при смешивании приводят к изменению размеров во время и после установки, плотности и внешнего вида.

Изменения размеров: точность измерений – важное требование многих стоматологических материалов.

Успех многих восстановительных процедур зависит от изменений размеров, которые происходят при литье сплавов или установки прямых восстановительных материалов [5].

Плотность – свойство, которое влияет на аспекты прочности слепочного материала.

С целью уменьшения таких дестабилизирующих сил можно выбрать сплав с более низкой плотностью.

Следовательно, если жесткая (высокий модуль упругости), используется материал с низкой плотностью, равной производительности может быть достигнута с учетом экономии веса.

Классифицируются слепочные материалы по консистенции, а именно на твердые, эластичные и термопластичные [7].

Эластичные слепочные материалы должны обладать высокой пластичностью в период введения в полость рта [7].

Слепочные материалы применяют для получения точного отпечатка зубов и тканей полости рта. По этому отпечатку или оттиску можно отливать модель, на которой изготавливают конструкции полных или частичных съемных зубных протезов, коронок, мостовидных протезов и вкладок [8].

Применительно к слепочным материалам период затвердевания предполагает минимальное количество времени пребывания (нахождения) ложки со слепочным материалом в полости рта [8].

Точность оттисков зависит, в частности, от точности размеров реплики, на которой он построен. Таким образом, которые происходят во время и после установки этих модельных материалов должна, в идеале, быть минимальным для создания точной модели. Следовательно, размерность и стабильность после настройки должна быть такой же хорошей, насколько это возможно [9–10].

Деформация при сжатии является важной характеристикой эластичного материала, которую определяют согласно ГОСТ 31573-2012.

На кафедре «Конструирование и производство приборов» БНТУ разработано устройство для определения консистенции и деформации при сжатии.

Схема конструкции этого устройства приведено на рисунке 2.

Устройство состоит из массивного основания 1, стеклянных пластин 2, образца материала 3, штока 4, сменного грузика 5, стопорного винта 6, кронштейнов 7 и 10, стопорных винтов 8, 11, 12 и 14 и стойки 13.

Устройство работает следующим образом: для проведения испытания образец 3 слепочного материала помещают между стеклянными пластинами 2 на основание 1 для приложения нагрузки непосредственно под нагружающий шток 4, на котором распложены сменный грузик 5. Шток закреплен в кронштейне 7, который фиксируется винтом 6. При соприкосновении штока со стеклянной пластиной происходит деформация материала 3. Изменения деформаций отслеживают по показанию индикатора 9 прикладывают нагрузку, медленно опуская шток на порцию слепочного материала. Выдерживают образец под нагрузкой в течение 5 с.

После этого снова фиксируют показание индикатора. А диаметр образца измеряют штангенциркулем.

При ортопедическом лечении получение оттиска является одним из ключевых моментов, определяющих качество будущей конструкции. Это обусловлено тем, что оттиск является связующим, информационным звеном между врачем



и зубным техником. Этот этап зубного протезирования имеет исключительно важное значение, поскольку точность оттиска определяет качество модели, на которой осуществляется конструирование любого протеза или лечебно-диагностического аппарата.

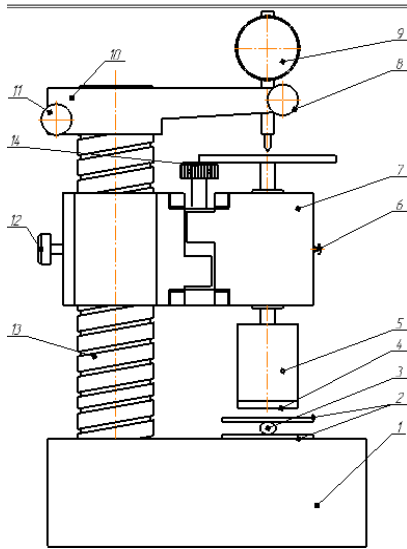


Рисунок 2 – Устройство для определения консистенции и деформации при сжатии

### Литература

1. Applied Dental Materials / J.F. McCabe, A.G. Walls // AWG Walls. – 2008. – P. 312.
2. Вязьмитина А.В. Материаловедение в стоматологии. Ростов н/Д, 2002. – 191с.
3. Дойников А.И., Синицын В.Д. «Зуботехническое материаловедение». Москва, 2006.
4. Зубопротезная техника. /Л.Д. Чулак, В.Г. Шутурминский – Одесса, 2001. – 315 с.
5. Клинеберг И., Джагер Р.; Под общ.ред. М.М.Антоника. Оклюзия и клиническая практика – М. : МЕДпресс-информ, 2006. – 200 с.
6. Король М.Д., Коробейников Л.С., Киндий Д.Д., Ярковий В.В. Оджубейська О.Д. Тактика курації больных в клинике ортопедической стоматологии. Полтава: Астроя, 2003. – 52 с.
7. Криштаб С.И. Ортопедическая стоматология. К. : Вища школа, 2006. – 440с.
8. Нападов А.Л. Артикуляция и протезирование в стоматологии. – К. : Здоровья, 2004.
9. Неспрядько В.П., Макеев В.Ф. Перспективные направления развития ортопедической стоматологии. Комплексное лечение и профилактика стоматологических заболеваний // Материалы 7 съезда стоматологов УССР (Львов, 3-5 октября 1989 г. ) – Киев, 2000. – С. 241–242.
10. Неспрядько В.П., Рожко М.М. Ортопедическая стоматология. Киев, Книга плюс, 2003.

УДК 621.371

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОПРОЗРАЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕНОК С АРМИРУЮЩИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Будай А.Г.<sup>1</sup>, Кныш В.П.<sup>1</sup>, Кучинский П.В.<sup>1</sup>, Малый С.В.<sup>2</sup>, Орлова А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Прохождение электромагнитных волн через диэлектрические стенки является ключевой задачей для широкого класса прикладных проблем: распространение электромагнитных волн в зданиях и сооружениях; электромагнитная совместимость; защита информации; радиоэкология; антенные обтекатели и укрытия; радиолокация.

Для обеспечения механических свойств диэлектрических конструкций в их стенках размещаются сетки или решетки из проводящих материалов. Наличие металлических элементов приводит к ухудшению радиопрозрачных свойств армированных диэлектрических стенок.

Одним из перспективных способов решения этой проблемы является использование внешних поляризаторов, размещаемых конформно поверхности стенок. Для этого поляризаторы должны удовлетворять следующим свойствам: иметь малую толщину; обеспечивать поворот поляризации прошедшей через стенку волны на произвольный угол; быть технологичными в из-

готовлении и использовании; иметь малый вес и низкую стоимость. Указанным требованиям удовлетворяют структуры, рассмотренные в работах [1, 2]. Поляризаторы представляют собой периодические решетки из прямоугольных полосковых элементов, расположенных над поверхностью металлического экрана. Для поляризаторов проходного типа экран перфорирован отверстиями, расположенными в узлах прямоугольной сетки. По своей структуре и функциональным возможностям поляризаторы указанного типа относятся к метаповерхностям.

С целью оценки возможности использования поляризаторов проходного типа для улучшения радиопрозрачности стенок, армированных металлическими элементами, были численно решены задачи взаимодействия плоской линейно поляризованной электромагнитной волны со следующими структурами:

– плоская периодическая решетка из параллельных металлических брусьев (рисунок 1);

– периодическая решетка из металлических брусьев и расположенный параллельно ее поверхности один проходной полосковый поляризатор (рисунок 3);

– периодическая решетка из металлических брусьев и два проходных полосковых поляризатора (рисунок 5).

Вычислительный эксперимент проводился на базе метода минимальных автономных блоков, метода конечных интегралов и теории периодических структур. Исходная дифракционная задача сводилась к исследованию рассеяния электромагнитной волны на неоднородности, расположенной в пространственном волноводе, на стенках которого задавались условия периодичности. Поперечные размеры волновода совпадали с периодами исследуемой структуры.

Ниже приводятся результаты численного моделирования, полученные для структур со следующими электродинамическими параметрами:

- периоды решетки отверстий и полосковых элементов равны 15 мм;
- отверстия в экране имеют квадратную форму с размером стороны 2 мм;
- полоски имеют форму прямоугольных параллелепипедов с размерами  $10 \times 2 \times 0,2$  мм;
- толщина идеально проводящего экрана равна 0,2 мм;
- металлические стержни имеют квадратное сечение с размером стороны 1 мм;
- период решетки стержней равен 5 мм;
- расстояние от поляризатора до решетки стержней равно 12,5 мм;
- металлические перемычки, соединяющие полоски с экраном, имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $2 \times 0,2 \times 0,2$  мм.

С целью оценки влияния поляризаторов на прохождения поля через решетку металлических стержней был рассмотрен случай, когда все элементы конструкций находились в свободном пространстве. Электромагнитная волна падает нормально к плоскости решетки.

На рисунках 2, 4, 6 представлены частотные зависимости амплитуд коэффициентов отражения и прохождения. Рассмотрен случай нормального падения волны на структуру.

Таким образом, использование тонких поляризаторов на основе метаповерхностей, позволяет улучшить радиопрозрачность диэлектрических стенок, армированных металлической арматурой.



Рисунок 1 – Фрагмент периодической решетки из металлических брусьев

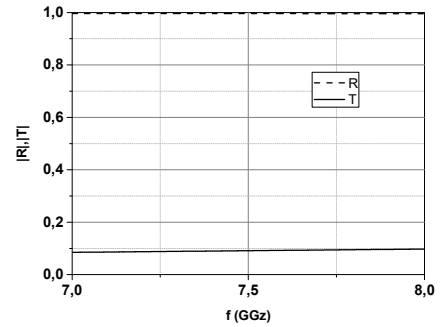


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения плоской волны. Электрическая компонента поля параллельна стержням

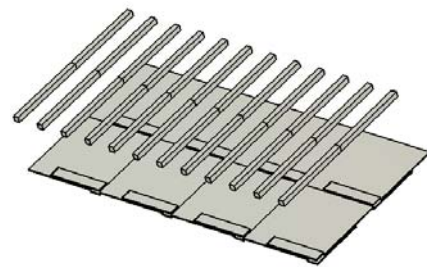


Рисунок 3 – Фрагмент периодической решетки из металлических брусьев и одного полоскового поляризатора проходного типа

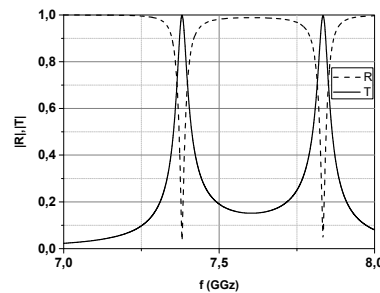


Рисунок 4 – Частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения плоской волны. Электромагнитная волна падает на структуру со стороны поляризатора и поляризована параллельно стержням

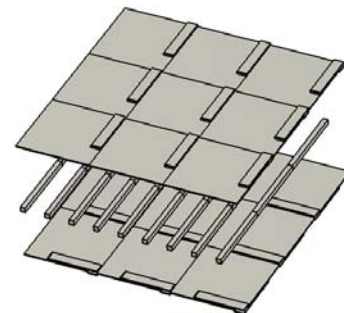


Рисунок 5 – Фрагмент периодической решетки из металлических брусьев и двух полосковых поляризаторов проходного типа

Результаты натурных измерений подтвердили работоспособность поляризаторов на основе связанных полосковых резонаторов.

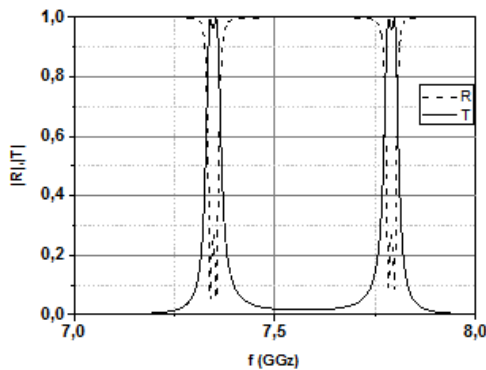


Рисунок 6 – Частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения плоской волны. Электрическая компонента поля параллельна стержням

УДК 530.182

### УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ТИПА WOBBLING KINK В ТЕОРИИ $\phi^4$ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЯ

Князев М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для изучения решения типа wobbling kink в модели  $\phi^4$  будем использовать аналитический подход, развитый в работе [1]. Уравнение движения в модели запишем следующим образом [2]:

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \phi - \phi^3 = 0. \quad (1)$$

Здесь для частных производных приняты обозначения  $\phi_{tt} = \partial^2 \phi / \partial t^2$  и  $\phi_{xx} = \partial^2 \phi / \partial x^2$ . Использование таких обозначений в последующих вычислениях будет очевидно и дополнительно не оговаривается. Статическое решение этого уравнения хорошо известно: Оно имеет вид:

$$\phi(x, 0) = \tanh\left(\frac{x - x_{in}}{\sqrt{2}}\right). \quad (2)$$

С целью упрощения вычислений выберем начало координат таким образом, чтобы параметр  $x_{in}$ , описывающий начальное положение статического решения (2), был равным нулю.

В настоящее время удастся получить только асимптотическое разложение для решений типа wobbling kink. Для того, чтобы это сделать, используется представление искомого решения в виде:

$$\phi(x, t) = \phi(x, 0) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \phi_n(x, t). \quad (3)$$

Соотношение (3), по сути дела, представляет собой ряд теории возмущений. Здесь  $\varepsilon$  – параметр порядка в той или иной конкретной задаче, который считается малой константой, а  $\phi_n(x, t)$  – некоторые неизвестные функции, которые предстоит определить. Для определения этих функций удастся построить бесконечную систему уравнений, последовательное решение которых, в принципе, позволяет найти все  $\phi_n$ . Особенностью получаемых таким образом выражений для этих функций является то, что они несут осциллирующий характер, причем частоты осцилляций как временной, так и пространствен-

### Литература

1. Будай А.Г., Кныш В.П. Малый С.В., Рудницкий А.С. Частотно-селективные экраны на основе связанных полосковых резонаторов // Материалы 7-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2014», 19-21 ноября 2014 г., Минск, 2014. – С. 262-263.

2. Малый С.В. Непоглощающие радиомаскирующие покрытия // Сборник научных статей Международной военно-научной конференции учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» «Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы», Минск, 2017. – С. 53–57.

ной составляющих каждой функции  $\phi_n$ , во-первых, различны, а, во-вторых, фиксированы.

Поскольку здесь ставится задача исследовать влияние возмущения на уже известное представление для решения типа wobbling kink в модели  $\phi^4$ , то в качестве начального состояния будем использовать суперпозицию статического кинка (2) и возмущения, имеющего гауссов профиль [3]:

$$\phi(x, 0) = \tanh\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + A \exp(-b(x - x_0)^2), \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда возмущения (считаем, что она достаточно мала; это, в свою очередь, означает, что и возмущение будет малым),  $b$  – величина, обратная ширине возмущения,  $x_0$  – начальное положение возмущения. Выбор такой формы возмущения связан с тем, что профиль гауссовой функции является гладким, и к тому же, его с достаточной для практических целей точностью можно считать локализованным в ограниченной области пространства

Соотношение (4), описывающее начальное состояние возмущенного решения типа wobbling kink, можно использовать с целью определения условий на параметры возмущения  $A$  и  $b$ . Для этого необходимо подставить (4) в статическое уравнение

$$\phi_{xx} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (5)$$

которое следует из уравнения (1). Это можно сделать, так как, поскольку соотношение (4) выполняется в начальный момент времени, то оно может быть использовано в качестве начального условия и для последующих моментов времени, то есть для динамической задачи. В результате после некоторых алгебраических преобразований получим следующее уравнение:

$$2b[1 - 2b(x - x_0)^2] - 3 \tanh^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - 3A \operatorname{Atanh}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \exp[-b(x - x_0)^2] - A^2 \exp[-2b(x - x_0)^2] + 1 = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение содержит три параметра возмущения:  $A$ ,  $b$  и  $x_0$ . Традиционно считается, что параметр  $x_0$  можно выбирать произвольным образом из соображений удобства вычислений и анализа результатов. Обычно его принимают равным нулю. Таким образом, в уравнении остаются только два очень важных параметра, характеризующих возмущение, а именно,  $A$  и  $b$ . На этом основании уравнение (6) можно рассматривать как уравнение связи между этими параметрами. Это означает, что мы не сможем построить возмущенное решение типа wobbling kink в модели  $\phi^4$  при возмущении гауссова типа с произвольными значениями параметров. Это удастся сделать только для тех случаев, для которых амплитуда возмущения и величина, обратная ширине возмущения, будут удовлетворять уравнению (6).

Уравнение (6) является трансцендентным. Точное аналитическое решение этого уравнения построить не удастся. Можно найти его приближенное решение или решить это уравнение при помощи численных методов. К тому же, уравнение одно. А неизвестных параметров в нем – два. Поэтому, исходя из уравнения (8), можно найти только один параметр. Другой параметр надо определить независимым способом или принять, что он будет иметь произвольное значение (которое, однако, будет определяться рассматриваемой задачей).

Можно оценить рассматриваемые параметры для некоторых частных случаев, используя представления для предельных случаев [4]. Пусть, например, значение координаты  $x$  достаточно велико. В этом случае из уравнения (8) можно получить соотношение вида  $b \sim \frac{1}{x}$ . Данная оценка хорошо согласуется с допущением о малости параметра  $b$ , учитывая диапазон значений координаты. Ещё для одного частного случая, когда система находится в начале координат ( $x = x_0 = 0$ ) из уравнения (6) можно получить достаточно простое соотношение вида  $2b + 1 = A^2$  между параметрами возмущения.

Уравнение (6) можно получить и непосредственно из динамического уравнения (1). Для этого нужно подставить соотношения (3) и (4) в уравнение (1). В результате, если выписать коэффициенты при одинаковых степенях  $\varepsilon$  получим систему уравнений для функций  $\phi_n$ . Отличительной особенностью развиваемого в настоящей работе подхода по сравнению с подходом, представленным в работе [1], является следующее обстоятельство. В работе [1], вследствие отсутствия возмущающего слагаемого, удастся,

несмотря на нелинейный характер задачи, представить уравнение (1) в виде бесконечной суммы уравнений для каждой степени  $n$  параметра  $\varepsilon$ , начиная с  $n = 1$ . Наличие возмущения в нашем случае приводит к появлению дополнительного уравнения – уравнения, соответствующего  $\varepsilon$  в нулевой степени. Это уравнение получается, если приравнять нулю все слагаемые, которые стоят при коэффициентах  $\varepsilon^0$ . Оказывается, это в точности будет уравнение (6).

Теперь на это уравнение можно взглянуть с другой точки зрения, по сравнению с тем, что было отмечено выше. Можно сказать, что для каждой конкретной системы, описываемой уравнением (1) и имеющей в качестве начального приближения условие (4), параметры возмущения имеют некоторые фиксированные значения (по крайней мере, в линейном приближении). Следовательно, в этом случае уравнение (6) будет определять множество значений координаты  $x$ , для которых возможно существование решения типа wobbling kink. Относительно случая, рассмотренного в работе [1], такое приближение определялось обычным кинком (2).

Дальнейшее исследование показывает, что и при наличии возмущения, по крайней мере, в линейном приближении для решения типа wobbling kink будет характерно наличие осцилляций как временной, так и пространственной составляющих решения. Однако, если в отсутствие возмущения частоты колебаний для обеих составляющих не менялись, то при наличии возмущения фиксированной остается только частота колебаний временной компоненты решения. Частота же колебаний пространственной составляющей решения оказывается зависящей от координаты  $x$ .

Следует отметить, что фиксированная частота колебаний временной составляющей решения типа wobbling kink является следствием соотношения (3), которое фактически представляет собой разложение по стоячим волнам. Последующий учет ангармоничности колебаний приведет к тому, что и частота колебаний временной составляющей решения будет переменной величиной.

### Литература

1. Segur, H. Wobbling kink in  $\phi^4$  and sine-Gordon theory / H. Segur // J. Math. Phys. – 1983. – V. 24, № 6. – P. 1439–1443.
2. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – М. : Мир, 1985. – 416 с.
3. Piragua, H. Studying the topological stability of the  $\lambda\phi^4$  kink / H. Piragua, P.S. Letelier // <http://xxx.lanl.gov> (arXiv:nlin/1004.4643).
4. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М. : Наука, 1978. – 228 с.

УДК 004.056

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА КОЧА ДЛЯ СОКРЫТИЯ ДАННЫХ В QR-КОД**  
**Ковынёв Н.В.**

*Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана*  
*Москва, Российская Федерация*

Одна из сложных задач, которую приходится решать в современном цифровом обществе: размещение большого количества информации на ограниченной площади. С применением QR-кода данная задача перестала быть неразрешимой. Используя данный инструмент, можно донести до пользователя требуемую ему информацию или же скрыть в QR-коде информацию, которая сможет защитить от подделки какое-либо изделие или продукт [1]. В данной статье будет рассмотрено применение стегозаписи в контейнер QR-кода с применением алгоритма Коча.

В качестве проверки устойчивости записи будут проделаны следующие действия: пересылка стего-сообщения по интернету и попытка его восстановления; фотография и распознавания стего при помощи смартфона.

В алгоритме Коча[2] в блок размером NxN осуществляется встраивание 1 бита ЦВЗ (цифровых водяных знаков). Псевдослучайно выбираются два коэффициента ДКП (дискретное косинусное преобразование). Встраивание информации осуществляется следующим образом: для передачи бита 0 добиваются того, чтобы разность абсолютных значений коэффициентов была бы больше некоторой положительной величины, а для передачи бита 1 эта разность делается меньше некоторой отрицательной величины:

$$\begin{aligned} |c_b(j_{i,j}, k_{i,1}) - c_b(j_{i,2}, k_{i,2})| &> \varepsilon, \text{ if } s_i = 0 \\ |c_b(j_{i,j}, k_{i,1}) - c_b(j_{i,2}, k_{i,2})| &< -\varepsilon, \text{ if } s_i = 1. \end{aligned}$$

Рисунок 1 – Коэффициенты

В QR-код помещено сообщение: «Обнаружение и распознавание сигналов». Загрузим созданный QR-код формата bmp в среду MathCAD.



Рисунок 2 – QR-код

Далее формируется матрица (число строк X и число столбцов Y) и разбивается на блоки размерности N, общее количество блоков обозначается N\_total:

$$X := \text{rows}(\text{qr\_code}) = 297, Y := \text{cols}(\text{qr\_code}) = 297$$

Далее вычисляются коэффициенты ДКП Фурье для каждого блока и применяется прямое

$$\xi(x) := \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{if } x = 0 \\ 1 & \text{if } x > 0 \end{cases}$$

$$\text{Right\_DCT}(\text{Blocks}) := \begin{cases} \text{for } b \in 0..N\_total - 1 \\ \text{for } v \in 0..N - 1 \\ \text{for } u \in 0..N - 1 \\ \Omega_{u,v} \leftarrow \frac{\xi(v)\xi(u)}{\sqrt{2N}} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \left[ (\text{Blocks})_{x,y} \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot v \cdot (2x+1)}{2N}\right] \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot u \cdot (2y+1)}{2N}\right] \right] \\ \Omega_y \leftarrow \Omega_r \end{cases}$$

Рисунок 3 – ДКП

Зададим параметры стегозаписи в контейнер. Наше стегосообщение:

Message := "Homework. Koch algorithm"

В качестве ключа в выбранном алгоритме используются две позиции коэффициентов в матрице ДКП, которые будут использоваться при встраивании и извлечении сообщения:

$$v_1 := 4 \quad v_2 := 5 \quad v_1 := 3 \quad v_2 := 4$$

Для выбранного алгоритма также необходимо задать значение порога, с которым будут сравниваться результаты разности модулей коэффициентов ДКП, выбранных в качестве ключа.

Встраивание стего:

$$\text{D2B}(x) := \begin{cases} \text{for } i \in 0..N - 1 \\ \begin{cases} v_i \leftarrow \text{mod}(x, 2) \\ x \leftarrow \text{floor}\left(\frac{x}{2}\right) \end{cases} \end{cases}$$

Рисунок 4 – Встраивание стего

Выполнение обратного ДКП:

$$\text{Inverse\_DCT}(\text{Blocks}) := \begin{cases} \text{for } b \in 0..N\_total - 1 \\ \text{for } x \in 0..N - 1 \\ \text{for } y \in 0..N - 1 \\ \Omega_{x,y} \leftarrow \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{v=0}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1} \left[ \xi(v)\xi(u) (\text{Blocks})_{u,v} \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot v \cdot (2x+1)}{2N}\right] \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot u \cdot (2y+1)}{2N}\right] \right] \\ \Omega_y \leftarrow \Omega_r \end{cases}$$

Рисунок 5 – Обратное ДКП

Восстанавливаем исходную матрицу:

```
qr_stego :=
  QR ← Ω_Stego0
  for b ∈ 1..X + N - 1
    QR ← stack(QR, Ω_Stegob)
  QR_r ← 0
  for b ∈ (X + N)..N_total - 1
    QR_r ← Ω_Stegob if QR_r = 0
    QR_r ← stack(QR_r, Ω_Stegob) otherwise
    QR ← augment(QR, QR_r) if mod(b + 1, X/N) = 0
    QR_r ← 0 if mod(b + 1, X/N) ≠ 0
  QR ← (QR + |min(QR)|) · 255 / max(QR + |min(QR)|)
```

Рисунок 6 – Восстановление матрицы

Сохраняем в файл с названием «stego.bmp»:

```
WRITEBMP("stego.bmp") := qr_stego
```



Рисунок 7 – QR-код со стего

Попробуем считать QR-код с помощью приложения на смартфоне:



Рисунок 8 – Сообщение

Как мы видим, стегосообщение никак не повлияло на содержание записанного в QR-код сообщения и успешно скрыто.

Восстановим стего: разбиваем матрицу на блоки размерности N:

```
Blocks2 := fragmentation(qr_stego)
```

Применяем прямое ДКП и определяем ключ:

```
Ω2 := Right_DCT(Blocks2)
```

$$B2D(x) := \sum_{i=0}^{N-1} (x_i \cdot 2^i)$$

Восстанавливаем стего:

```
stego :=
  j ← 0
  for k ∈ 0..strlen(Message) - 1
    for i ∈ 0..N - 1
      Ωr ← Ω2i
      ω1 ← |Ωr(v1, v1)|
      ω2 ← |Ωr(v2, v2)|
      mi ← 0 if ω1 > ω2
      mi ← 1 if ω1 < ω2
      j ← j + 1
    stegok ← B2D(m)
  m ← 0
  stego
```

Рисунок 9 – Стего восстановление

Как мы видим, стегосообщение удачно восстановлено.

В данной статье были изучены возможности применения стегозаписи в контейнер в виде QR-кода для хранения ключей, либо персональных данных и написана программа, реализующая занесение текстового стего в QR-код.

В ходе экспериментов стегосообщение было успешно скрыто от расшифровки сканером QR-кода и успешно восстановлено по ключу.

### Литература

1. Ковалёв А.И. QR-коды, их свойства и применение // Молодой ученый. – 2016. – № 10. – С. 56–59. – URL <https://moluch.ru/archive/114/29398/> (дата обращения: 20.09.2018).
2. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. Москва, СОЛОН-Пресс, 2002, 272 с.

УДК 539.3

## ИЗГИБ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ КРУГОВОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ НА СЛОЖНОМ ОСНОВАНИИ

Козел А.Г.

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

В настоящее время использование трёхслойных конструкций в машино- и приборостроении повлекло за собой интенсивную разработку теорий и методов их расчёта. Деформирование круговых трёхслойных пластин в настоящее время

изучено, в основном, при опирании на однопараметрическое основание Винклера.

Модель упругого основания с использованием двух коэффициентов постели, учитывающая его сжимаемость и связность, была впервые ис-

пользована П.Л. Пастернаком [1] при взаимодействии с однородными элементами конструкций. Деформирование несимметричных по толщине упругих трёхслойных пластин на основании Пастернака исследовалось в работах [2, 3].

Здесь приведены постановки краевой задачи в усилиях и перемещениях упругопластической трёхслойной пластины, связанной со сложным двухпараметрическим основанием. В тонких несущих слоях принимаются гипотезы Кирхгофа, в несжимаемом по толщине заполнителе нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол  $\Psi$ , тангенциальные перемещения линейно распределены по толщине, не учитываются работа касательных напряжений.

Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Внешняя вертикальная нагрузка не зависит от координаты  $\varphi: q_0 = q_0(r)$ . На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев. На нижнюю поверхность пластины действует распределенная по ее площади реакция основания  $q_R$ , которую принимаем в соответствии с моделью Пастернака [1]:

$$q_R(r) = -\kappa_0 w + t_f \Delta w,$$

где  $\kappa_0, t_f$  – коэффициенты сжатия и сдвига,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

В силу симметрии нагрузки тангенциальные перемещения в слоях отсутствуют:  $u_\varphi^{(k)} = 0$  ( $k=1, 2, 3$  – номер слоя), а прогиб пластины, относительный сдвиг в заполнителе и радиальное перемещение координатной плоскости не зависят от координаты  $\varphi$ , т. е.  $w(r), \psi(r), u(r)$ . В дальнейшем эти функции считаются искомыми. Через  $h_k$  обозначена толщина  $k$ -го слоя.

Используя гипотезу прямолинейности нормали заполнителя  $2\varepsilon_{rz}^{(3)} = u_r^{(3)} + w_{,z} + w_{,r} = \psi$ , после интегрирования получим выражения радиальных перемещений в слоях  $u_r^k$  через искомые функции:

$$\begin{aligned} u_r^{(1)} &= u + c\psi - zw_{,r} \quad (c \leq z \leq c + h_1), \\ u_r^{(3)} &= u + z\psi - zw_{,r} \quad (-c \leq z \leq c), \\ u_r^{(2)} &= u - c\psi - zw_{,r} \quad (-c - h_2 \leq z \leq -c), \end{aligned}$$

где  $(u + c\psi)$  – величина смещения внешнего несущего слоя за счет деформации заполнителя, для второго несущего слоя это смещение  $(u - c\psi)$ ,  $z$  – координата рассматриваемого волокна, запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Деформации в слоях имеем в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(1)} &= u_{,r} + c\psi_{,r} - zw_{,rr}, \quad \varepsilon_\varphi^{(1)} = \frac{1}{r}(u + c\psi - zw_{,r}), \quad \varepsilon_{rz}^{(1)} = 0, \\ \varepsilon_r^{(2)} &= u_{,r} - c\psi_{,r} - zw_{,rr}, \quad \varepsilon_\varphi^{(2)} = \frac{1}{r}(u - c\psi - zw_{,r}), \quad \varepsilon_{rz}^{(2)} = 0, \\ \varepsilon_r^{(3)} &= u_{,r} + z\psi_{,r} - zw_{,rr}, \quad \varepsilon_\varphi^{(3)} = \frac{1}{r}(u + z\psi - zw_{,r}), \quad \varepsilon_{rz}^{(3)} = \frac{1}{2}\psi. \end{aligned}$$

Предположим, что материалы несущих слоев в процессе деформирования могут проявлять упругопластические свойства, заполнитель – нелинейно упругие. Для их описания используем соотношения теории малых упругопластических деформаций:

$$\begin{aligned} s_\alpha^{(k)} &= 2G_k(1 - \omega_k(\varepsilon_u^{(k)}))\varepsilon_\alpha^{(k)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k\varepsilon^{(k)}, \\ s_{rz}^{(3)} &= 2G_3\varepsilon_{rz}^{(3)}(1 - \omega_3(\varepsilon_u^{(3)})), \quad (k=1, 2, 3, \alpha=r, \varphi), \end{aligned}$$

где  $s_\alpha^{(k)}, \varepsilon_\alpha^{(k)}, \sigma^{(k)}, \varepsilon^{(k)}$  – девиаторные и шаровые части тензоров напряжений и деформаций;  $G_k, K_k$  – модули сдвиговой и объёмной деформации  $k$ -го слоя;  $\omega_k(\varepsilon_u^{(k)})$  – функции пластичности материалов несущих слоев, которые в случае  $\varepsilon_u^{(k)} \leq \varepsilon_y^{(k)}$  следует положить равными нулю;  $\varepsilon_u^{(k)}$  – интенсивность деформаций в  $k$ -м слое ( $k=1, 2$ ),  $\varepsilon_y^{(k)}$  – деформационный предел текучести материалов несущих слоёв;  $s_{rz}^{(3)}, \varepsilon_{rz}^{(3)}$  – касательное напряжение и угловая деформация в заполнителе;  $\omega_3(\varepsilon_u^{(3)})$  – универсальная функция, описывающая физическую нелинейность заполнителя, причём  $\omega_3 \equiv 0$  при  $\varepsilon_u^{(3)} \leq \varepsilon_s^{(3)}$ ;  $\varepsilon_s^{(3)}$  – предел физической нелинейности материала заполнителя.

Используя компоненты тензора напряжений  $\sigma_\alpha^{(k)}$  ( $\alpha=r, \varphi$ ), введем обобщенные внутренние силы и моменты в пластине:

$$\begin{aligned} T_\alpha &\equiv \sum_{k=1}^3 T_\alpha^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_\alpha^{(k)} dz, \\ M_\alpha &\equiv \sum_{k=1}^3 M_\alpha^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_\alpha^{(k)} z dz, \\ H_\alpha &= M_\alpha^{(3)} + c(T_\alpha^{(1)} - T_\alpha^{(2)}). \end{aligned}$$

Компоненты тензора напряжений в слоях, представим через девиаторную и шаровую части тензора деформаций, выделив упругие (индекс «е») и неупругие (индекс «ω») слагаемые:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^{(k)} &= \sigma_{ae}^{(k)} - \sigma_{\omega\omega}^{(k)}, \quad (\alpha=r, \varphi; k=1, 2, 3), \\ \sigma_{rz}^{(3)} &= \sigma_{rze}^{(3)} - \sigma_{r\omega\omega}^{(3)}, \end{aligned}$$

где

$$\sigma_{ae}^{(k)} = 2G_k \varepsilon_\alpha^{(k)} + K_k \theta^{(k)}, \quad \sigma_{\omega\omega}^{(k)} = 2G_k \omega_k \varepsilon_\alpha^{(k)},$$

$$\sigma_{r\varphi}^{(3)} = 2G_3 \vartheta_{r\varphi}^{(3)}, \quad \sigma_{r\omega}^{(3)} = 2G_3 \omega_3 \vartheta_{r\omega}^{(3)}.$$

Обобщённые внутренние усилия, с учётом замены напряжения  $\sigma_{\alpha}^{(k)}$  соответственно на  $\sigma_{\alpha e}^{(k)}$ ,  $\sigma_{\alpha\omega}^{(k)}$ , будут следующими:

$$\begin{aligned} T_{\alpha} &= T_{\alpha e} - T_{\alpha\omega} = \sum_{k=1}^3 T_{\alpha e}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 T_{\alpha\omega}^{(k)}, \\ M_{\alpha} &= M_{\alpha e} - M_{\alpha\omega} = \sum_{k=1}^3 M_{\alpha e}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 M_{\alpha\omega}^{(k)}, \\ H_{\alpha e} &= M_{\alpha e}^{(3)} + c(T_{\alpha e}^{(1)} - T_{\alpha e}^{(2)}), \\ H_{\alpha\omega} &= M_{\alpha\omega}^{(3)} + c(T_{\alpha\omega}^{(1)} - T_{\alpha\omega}^{(2)}). \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая деформирование круговой упругой трехслойной пластины на упругом основании была получена с помощью принципа Лагранжа в [2]. Поэтому ее можно применить и здесь как исходную:

$$\begin{aligned} T_{r,r} + \frac{1}{r}(T_r - T_{\varphi}) &= 0, \quad H_{r,r} + \frac{1}{r}(H_r - H_{\varphi}) = 0, \\ M_{r,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r,r} - M_{\varphi,r}) &= -(q_0 - q_R). \end{aligned}$$

Выделяя в обобщенных внутренних усилиях линейные и нелинейные составляющие, получим их в виде:

$$\begin{aligned} T_{r,r} + \frac{1}{r}(T_r - T_{\varphi}) &= p_{\omega}, \quad H_{r,r} + \frac{1}{r}(H_r - H_{\varphi}) = h_{\omega}, \\ M_{r,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r,r} - M_{\varphi,r}) &= -q_0 + q_R + q_{\omega}. \end{aligned}$$

Здесь в левой части уравнений собраны линейные составляющие обобщенных внутренних усилий, причем нижний индекс «e» в дальнейшем опущен для удобства. Нелинейные добавки сосредоточены справа и включены в слагаемое с нижним индексом « $\omega$ »:

$$\begin{aligned} p_{\omega} &= T_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(T_{r\omega} - T_{\varphi\omega}), \\ h_{\omega} &= H_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(H_{r\omega} - H_{\varphi\omega}), \\ q_{\omega} &= M_{r\omega,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r\omega,r} - M_{\varphi\omega,r}). \end{aligned}$$

Граничные условия в усилиях замыкают постановку задачи теории малых упругопластических деформаций:

УДК 544.64:544.032.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИТРИДНЫХ КЕРАМИК

Козловский А.Л., Гладких Т.М., Здоровец М.В.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Нитрид алюминия (AlN) является керамическим материалом, который обладает чрезвычайно интересным сочетанием высокой теплопроводности и отличных изоляционных свойств, благодаря которым обусловлено широкое применение AlN в

$$\begin{aligned} T_r &= T_r^1 + T_{\omega}, \quad H_r = H_r^1 + H_{\omega}, \quad M_r = M_r^1 + M_{\omega}, \\ M_{r,r} + \frac{1}{r}(M_r - M_{\varphi}) &= Q^1 + M_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(M_{r\omega} - M_{\varphi\omega}). \end{aligned}$$

Линейные (упругие) составляющие обобщенных внутренних усилий по-прежнему выражаются через перемещения по формулам приведенным в [2], поэтому система дифференциальных уравнений равновесия будет иметь вид:

$$\begin{aligned} L_2(a_1 u + a_2 \psi - a_3 w, r) &= p_{\omega}, \\ L_2(a_2 u + a_4 \psi - a_5 w, r) &= h_{\omega}, \end{aligned}$$

$$L_3(a_3 u + a_5 \psi - a_6 w, r) - \kappa_0 w + t_f \Delta w = -q_0 + q_{\omega}.$$

$a_i$  – коэффициенты, учитывающие упругие и геометрические параметры слоев,  $L_k$  – линейные дифференциальные операторы [3].

Краевая задача по определению прогиба круглой упругопластической пластины на основании Пастернака замыкается присоединением граничных условий.

$$u = \psi = w = w, r = 0 \text{ при } r = R.$$

При шарнирном опирании контура пластины  $u = \psi = w = 0, M_r = 0$  при  $r = R$ .

В случае свободного контура пластины  $\psi = 0, T_r = M_r = M_{r,r} = 0$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (проект № T18P-090).

### Литература

- 1 Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М. : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 55 с.
- 2 Козел, А.Г. Перемещения в круговой трехслойной пластине на двухпараметрическом основании / А.Г. Козел // Механика. Исследования и инновации, 2017. – Вып. 10. – С. 90–95.
- 3 Козел, А.Г. Деформирование круговой трехслойной пластины, заземленной по контуру, на основании Пастернака / А.Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : БНТУ, 2018. – № 33. – С. 318–322.



тительной технике или высокоточной электронике [1-3]. При этом одним из важных условий применимости керамических материалов в области разработки микроэлектронных устройств является изучение материалов к различным видам излучений. Изучение изменения свойств керамических материалов в результате взаимодействия с тяжелыми ионами, образование неравновесных концентраций дефектов при упругих и неупругих столкновениях налетающих ионов с атомами мишени может дать представление о процессах дефектообразования в керамических материалах и их устойчивости к радиационному облучению.

Образцы керамик AlN были приобретены у CRYSTAL GmbH (Germany), плотность материала составляла  $3.226 \text{ г/см}^3$ . Твердость –  $1100 \text{ кг/мм}^2$ , Удельное сопротивление  $>10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Облучение образцов проводилось на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60» Астанинского филиала Института Ядерной Физики ионами  $\text{C}^{2+}$  с энергией  $40 \text{ кэВ}$  с флюенсом от  $10^{14}$  до  $10^{15} \text{ ион/см}^2$  при температуре облучения  $300 \text{ К}$ . Согласно расчетам максимальной длины пробега и энергетических потерь налетающих ионов выполненных с помощью программного кода SRIM Pro 2013, максимальная длина пробега ионов  $\text{C}^{2+}$  с энергией  $20 \text{ кэВ/заряд}$  составляет  $136 \pm 10 \text{ нм}$ , радиальное отклонение –  $35 \pm 5 \text{ нм}$ , количество вакансий создаваемых одним ионом составило  $268 \pm 20$  вакансий/ион. Энергетические потери ионов на электронах  $dE/dx_{\text{elec}} = 0,32 \text{ кэВ/нм}$ , энергетические потери на ядрах  $dE/dx_{\text{nuclear}} = 0,12 \text{ кэВ/нм}$ , энергия первично-выбитого атома составляет  $25 \text{ эВ}$ , в то время как энергия связи атомов в кристаллической решетке составляет  $3.36 \text{ эВ}$ .

На основе полученных данных методами РСА, РЭМ, ЭДС установлены зависимости изменения кристаллографических характеристик и прочностных свойств от дозы облучения ионами  $\text{C}^{2+}$  с энергией  $40 \text{ кэВ}$ . Установлено, что в результате облучения в приповерхностном слое наблюдается формирование примесной фазы  $\text{Al}_4\text{C}_3$ , приводящей к увеличению параметров кристаллической решетки, что свидетельствует об имплантации ионов  $\text{C}^{2+}$  и формировании фазы внедрения

в структуре. При этом увеличение вкладов примесных фаз приводит к снижению интенсивности дифракционных пиков, а также их асимметрии, которая обусловлена увеличением микронапряжений и деформаций в решетке. Изменение параметров кристаллической структуры приводит к снижению плотности керамик и увеличению пористости за счет образования областей разупорядоченности в структуре. Снижение плотности материала и изменение кристаллографических характеристик, обусловленное процессами дефектообразования и последующей их миграции приводит к разрушению ионных и химических связей в материале, которые влияют на прочностные характеристики материала. Методом АСМ установлено, что увеличение дозы облучения приводит к увеличению плотности хиллоков и трещин на поверхности, которые приводят к снижению твердости приповерхностного слоя. Установлено, что в результате облучения и образования каскадов дефектов основные изменения прочностных свойств керамик наблюдаются в приповерхностном слое толщиной  $200\text{-}250 \text{ нм}$ .

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проделанными исследованиями в этой области, а также могут внести существенный вклад в понимание процессов дефектообразования и радиационной устойчивости в керамических нитридных материалах, которые являются перспективными кандидатами для применения в современных ядерных реакторах.

#### Литература

1. Rosenberg Z., Brar N.S., Bless S.J. Dynamic high-pressure properties of AlN ceramic as determined by flyer plate impact // Journal of applied physics. – 1991. – V. 70. – № 1. – P. 167–171.
2. Wang K., Wang C. Aluminum vacancy related dielectric relaxations in AlN ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2018. – V. 101. – № 5. – P. 2009–2016.
3. Szenes G. Ion-induced amorphization in ceramic materials // Journal of nuclear materials. – 2005. – V. 336. – № 1. – P. 81–89.

УДК 620.179.14

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВЕДЕННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Короткевич З.М., Осипов А.А., Счастный А.С.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Контроль качества термообработки изделий из различных марок сталей с использованием той или иной магнитной характеристики широко применяется в настоящее время. Но не всегда по одной или двум магнитным характеристикам можно судить о качестве проведенной термооб-

работки. Это связано с тем, что для некоторых марок стали нет однозначной зависимости между измеряемой магнитной характеристикой и температурой термообработки на всем диапазоне ее изменения. Поэтому прибегают к использованию сочетания нескольких магнитных параметров,

которые в той или иной степени чувствительны к фазово-структурным изменениям в материале при термообработке [1, 2].

В докладе рассматривается возможность использования многопараметрового метода неразрушающего контроля на примере углеродистых инструментальных сталей У8А и У10А. Образцы в виде колец, изготовленные из этих марок сталей, подвергались закалке и последующему отпуску при различных температурах в диапазоне от 0 до 600 °С. На этих образцах проводились измерения различных магнитных характеристик по петле магнитного гистерезиса при квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи. Структурные изменения, происходящие в образцах, и их магнитные характеристики подробно описаны в [3].

Для оценки температуры отпуска образцов из стали У8А была предложена следующая математическая модель:

$$T_{\text{отп расч}} = b_0 + b_1 \cdot H_r + b_2 \cdot H_c + b_3 \cdot H_{\mu m} + b_4 \cdot H_{\mu dm} + b_5 \cdot V_{Hr} + b_6 \cdot V_r + b_7 \cdot V_{Hc} + b_8 \cdot V_{\mu m}, \quad (1)$$

где  $b_0 \dots b_8$  – коэффициенты уравнения, приведены в таблице.

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ |
| 1050  | -2,81 | 1,73  |
| $b_3$ | $b_4$ | $b_5$ |
| 0,88  | -0,11 | 3970  |
| $b_6$ | $b_7$ | $b_8$ |
| 1500  | 1320  | -3960 |

Используемые магнитные характеристики: релаксационная коэрцитивная сила  $H_r$ ; коэрцитивная сила  $H_c$ ; напряженности намагничивающего поля  $H_{\mu dm}$  и  $H_{\mu m}$ , соответствующие максимуму дифференциальной магнитной проницаемости и максимальной магнитной проницаемости; релаксационная магнитная индукция  $V_{Hr}$ , остаточная магнитная индукция  $V_r$ ; магнитные индукции  $V_{\mu m}$  и  $V_{Hc}$  при магнитном поле, равном соответственно  $H_{\mu m}$  и коэрцитивной силе  $H_c$  на начальной кривой намагничивания.

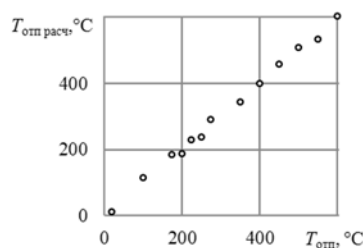


Рисунок 1 – Корреляционное поле между температурой отпуска при термообработке  $T_{\text{отп}}$  и рассчитанной по (1) –  $T_{\text{отп расч}}$  (сталь марки У8А)

Коэффициент множественной корреляции для данной математической модели составляет  $R = 0,998$ , а среднее квадратическое отклонение  $S = 19$  °С. На рисунке 1 приведено корреляционное поле между температурой отпуска  $T_{\text{отп расч}}$ ,

полученной по (1), и  $T_{\text{отп}}$  при термообработке образцов из стали У8А.

Отпуск при температуре 100 °С заметных структурных изменений в материале не вызывает, поэтому магнитные характеристики  $V_{Hr}$ ,  $V_r$ ,  $V_{\mu m}$  и  $V_{Hc}$  по сравнению с исходным состоянием не изменяются. При увеличении температуры отпуска от 100 до 350 °С величины  $V_r$ ,  $V_{\mu m}$  и  $V_{Hc}$  возрастают, затем наблюдается спад значений  $V_{\mu m}$  и  $V_{Hc}$  до температуры 450 °С, а  $V_r$  до 400 °С, и последующий рост до 500 °С, затем опять уменьшение их величин до 600 °С. Магнитная индукция  $V_{Hr}$  в диапазоне температур отпуска 175–600 °С монотонно убывает. Величины параметров  $H_r$ ,  $H_c$ ,  $H_{\mu dm}$  и  $H_{\mu m}$  изменяются аналогично друг другу, убывая с разной степенью чувствительности к изменению температуры термообработки от 0 до 450 °С, возрастая от 450 до 500 °С и затем опять спадая аналогично характеристикам магнитной индукции  $V_r$ ,  $V_{\mu m}$  и  $V_{Hc}$ . Такая неоднозначность зависимостей магнитных характеристик этой марки стали от температуры термообработки приводит к необходимости внедрения многопараметрового подхода для решения задач неразрушающего контроля.

При температурах отпуска от 175 до 600 °С погрешность определения расчетной температуры составила около 5%, что позволяет говорить о возможности использования данной модели для определения температуры проведенного отпуска стали У8А по магнитным характеристикам.

Аналогично была построена математическая модель для образцов, изготовленных из стали У10А.

$$T_{\text{отп расч}} = b_0 + b_1 \cdot H_c + b_2 \cdot V_r + b_3 \cdot V_m + b_4 \cdot \mu_{dHc} + b_5 \cdot V_{Hc} + b_6 \cdot \mu_m + b_7 \cdot \mu_{dm} + b_8 \cdot H_{\mu dm} + b_9 \cdot V_{\mu dm}, \quad (2)$$

где  $b_0 \dots b_9$  – коэффициенты уравнения, приведены в таблице

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ |
| -299  | 0,78  | 2500  | -2230 | -0,75 |
| $b_5$ | $b_6$ | $b_7$ | $b_8$ | $b_9$ |
| 2180  | 1,21  | 0,54  | -0,76 | -331  |

Используемые магнитные характеристики:  $H_c$ ,  $V_r$ , максимальная магнитная индукция  $V_m$ , дифференциальная магнитная проницаемость  $\mu_{dHc}$  и магнитная индукция  $V_{Hc}$  при поле равном  $H_c$ , максимальная магнитная проницаемость  $\mu_m$ , поле  $H_{\mu dm}$  и магнитная индукция  $V_{\mu dm}$  при  $\mu_{dm}$ .

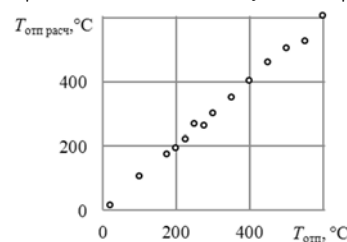


Рисунок 2 – Корреляционное поле между температурой отпуска при термообработке  $T_{\text{отп}}$  и рассчитанной по (2) –  $T_{\text{отп расч}}$  (сталь марки У10А)

Коэффициент множественной корреляции для данной математической модели составляет  $R = 0,998$ , а среднее квадратическое отклонение  $S = 18$  °С. На рисунке 2 приведено корреляционное поле между температурой отпуска  $T_{\text{отп расч}}$ , полученной по (2), и  $T_{\text{отп}}$  при термообработке образцов из стали У10А.

Для образцов из стали У10А характерны аналогичные структурные изменения, как и для образцов из стали У8А. Параметры  $B_r$ ,  $B_{Hc}$  и  $B_m$  возрастают при увеличении температуры отпуска до 275 °С, в диапазоне температур от 275 до 400 °С наблюдается спад значений этих параметров с последующим их увеличением до 550 °С и спадом в конце диапазона отпуска. Величины магнитных проницаемостей возрастают в диапазонах температур 0-275 °С и 300-400 °С и убывают при температурах 275-300 °С и 400-500 °С. В диапазоне изменения температуры 500-600 °С все магнитные проницаемости, кроме  $\mu_{dHc}$  возрастают, а  $\mu_{dHc}$  продолжает убывать. Две полевые характеристики ( $H_c$  и  $H_{\mu dm}$ ) имеют аналогичную друг другу зависимость – в диапазонах от 0-350 °С убывают и от 350 до 450 °С возрастают, а затем снова убывают вплоть до 600 °С. Параметр  $B_{\mu dm}$  изменяется многократно на всем диапазоне проведения отпуска.

При термообработке от 100 до 600 °С, погрешность расчетной температуры составила около 7 %, что позволяет говорить о возможности использования данной модели для определения температуры проведенного отпуска стали У10А по магнитным характеристикам в пределах погрешности.

Данную реализацию многопараметрового контроля с использованием математической модели и построением корреляционного поля можно применить для установления температуры проведенного отпуска, но необходимо для каждой марки стали строить отдельную модель. Кроме того, могут понадобиться другие магнитные характеристики, отличные от приведенных.

Данная методика может увеличить возможности использования магнитных характеристик для неразрушающего контроля, решить проблему отсутствия однозначно зависимых магнитных характеристик во всем диапазоне контроля качества термообработки.

### Литература

1. Бида Г.В. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2007. – № 8. – С. 3–24.
2. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального циклического импульсного перемагничивания / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013. – № 1. – С. 3–27.
3. Матюк, В.Ф. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, З.М. Короткевич, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 1. – С. 25–49.

УДК 615.47

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Кравченко А.Ю., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Аппараты ультразвуковой терапии занимают свое заслуженное место среди средств физиотерапевтического лечения. Данная группа аппаратов применяется как для лечения определенных заболеваний, так и для реабилитации. Суть ультразвуковой терапии состоит в контактном воздействии ультразвуком в диапазоне интенсивностей до 3,0 Вт/см<sup>2</sup>, на проекцию к поверхности кожи целевого участка воздействия. Также данный метод широко применяют в комбинации с лекарственными веществами, которые наносят на поверхность кожи в области проведения процедуры. Это способствует передаче лекарственного средства через кожу вглубь тканей под воздействием ультразвука. Такая процедура ультрафонофореза позволяет достигать лечебного

эффекта, не только лишь за счет воздействия собственно ультразвука, а и за счет введенного лекарственного препарата.

Процесс преобразования электрической энергии в акустическую энергию ультразвука, в современных аппаратах ультразвуковой терапии, применяемых в области физиотерапии, происходит, в основном, посредством колебания кристаллов пьезокерамики в механические колебания определенной частоты. Соответственно, кристалл пьезоэлемента преобразует не всю электрическую энергию в акустическую, а существенная часть электрической энергии преобразуется в тепло нагрева самого пьезокерамического кристалла и окружающего пространства. Это, в свою очередь, может приводить к повышению

температуры внешних частей рабочей поверхности самого ультразвукового излучателя, который содержит, помимо остальных частей, и сам пьезоэлемент. Однако чрезмерное повышение температуры рабочей поверхности ультразвукового излучателя является нежелательным, в процессе его эксплуатации, так как может потенциально привести к перегреву биологических тканей, с которыми он соприкасается. И, как следствие, вызвать дискомфорт пациента, вплоть до болевых ощущений. Следует также иметь в виду, что не все пациенты, в силу состояния своего здоровья, или же психического состояния, могут сообщить об дискомфортных ощущениях, в зоне применения ультразвукового излучателя. Поэтому, подобное обстоятельство, с учётом изложенных выше особенностей, создает проблему безопасности пациента.

Значение возрастания градиента  $\Delta T = T - T_0$  текущей  $T$  и первоначальной  $T_0$  температур преобразователя,  $\Delta T/\Delta t$  за время  $\Delta t = t - t_0$ , которое он может передать, можно описать, зная значение теплоёмкости  $C$  преобразователя [1]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_t}{mC}, \quad (1)$$

где  $m$  – это масса преобразователя, а  $P_t$  – мощность, рассеянная в нём.

Обозначим скорость возрастания температуры как:

$$V_T = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (2)$$

Учитывая, что  $\Delta T/\Delta t$ , является скоростью возрастания градиента температуры. В действительности, ультразвуковой излучатель состоит не только из пьезоэлектрического преобразователя, а еще из корпусных, конструкционных деталей, согласовывающих слоёв, крепёжных элементов и других частей, каждый из которых имеют, в свою очередь, собственную теплоёмкость. И каждый из этих компонентов будет начинать нагреваться (в случае нагрева пьезоэлемента), в зависимости от его собственной теплоёмкости. На температуру рабочей поверхности ультразвукового излучателя будет влиять каждый компонент, из которых он состоит. Для упрощения, в данном случае, примем, что ультразвуковой излучатель представляет собой квазиоднородный объект с точки зрения температурных характеристик. В таком случае, предположим, что нагрев происходит в пластине с площадью  $S$ , соответствующей площади преобразователя. Тогда, с учётом вышеизложенного, перепишем уравнение (1) в виде:

$$V_T = \frac{P_t}{Sd\rho C}, \quad (3)$$

где  $d$  и  $\rho$  – эффективная толщина и плотность приведенной конструкции преобразователя.

Коэффициент полезного действия преобразователя равен:

$$\eta = \frac{P_a}{P} \quad (4)$$

При этом эффективность пьезопреобразователя обозначим как  $\varepsilon$  и она может быть определена как отношение общей электрической мощности  $P$ , к выделяемой акустической мощности  $P_a$ , под нормальной акустической нагрузкой, что фактически является обратной величиной к коэффициенту  $\eta$  полезного действия. В таком случае получим:

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta}. \quad (5)$$

Часть мощности преобразователя идет на рассеяние и нагрев.

$$P_t = P - P_a = P_a \left[ \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) / \frac{1}{\eta} \right], \quad (6)$$

$$V_T = P_a \left[ \frac{(1 - \frac{1}{\eta})}{\frac{1}{\eta}} \right] = P_a (\eta - 1). \quad (7)$$

Тогда, преобразуем уравнение (3), с учётом уравнения (5), и получим:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_a}{S} \frac{(1 - \frac{1}{\eta})}{\frac{1}{\eta}} = I \frac{(1 - \frac{1}{\eta})}{\frac{1}{\eta}}, \quad (8)$$

где  $I$  – это пространственная средняя акустическая интенсивность около рабочей поверхности излучателя.

В случае, если преобразователь работает в воздухе, без приложенной к нему акустической нагрузки, то  $P_t \approx P = P_a / \varepsilon = \eta P_a$ , то в данном случае:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_a}{S} \frac{1}{\frac{1}{\eta}} = I \frac{1}{\frac{1}{\eta}}. \quad (9)$$

Таким образом, для преобразователя, работающего в воздушной среде, скорость нагрева увеличивается в  $1/(1-\varepsilon)$  раз по сравнению со скоростью, когда преобразователь работает с нормальной акустической нагрузкой, такой как кожа.

В случае, когда выделение тепла происходит за счет нагрева пьезоэлемента, то выражение (9) можно преобразовать следующим образом. С учётом того, что толщина пьезоэлемента приблизительно связана с его резонансной частотой  $f$  соотношением  $d = v / 2f$ , где  $v$  – скорость распространения звука в материале пьезоэлемента, получим:

$$V_T = If \frac{2}{\frac{1}{\eta} \rho C} = If \frac{2\eta}{v\rho C} \quad (8)$$

Следовательно, можно утверждать, что скорость увеличения температуры в материале преобразователей будет приблизительно одинаковой,

если они работают со стабильной частотой и интенсивностью, что и подтверждается в работе [1].

Поэтому, для промышленного выпуска и использовании в медицинской практике ультразвукового излучателя [2] (Рис. 1) было проведено моделирование процесса изменения температуры рабочей зоны ультразвукового излучателя для процедур ультразвуковой терапии. Подобные исследования проводились и в статье [3]. На Рис. 2 приведены результаты моделирования и реальные градиенты температур ультразвукового датчика.

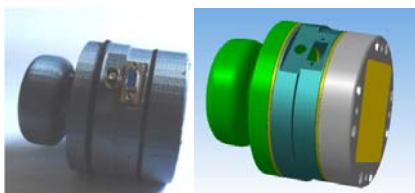


Рисунок 1 – Ультразвуковой излучатель

Применяя моделирование методами конечных элементов, мы можем создать тепловую модель, учитывающую параметры источника излучения тепловой энергии и всех его конструктивных элементов. Для верификации модели и подтверждения ее достоверности использовалось сравнение значений модели и тепловых полей опытного образца ультразвукового излучателя. Регистрация и измерения температур выполнено тепловизором MOBIL-3.

УДК 544.654.2

### МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРА ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ (InSb), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

Углов В.В.<sup>1</sup>, Драпезо А.П.<sup>2</sup>, Колесникова Е.А.<sup>1</sup>, Кулешов А.К.<sup>1</sup>, Русальский Д.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», Минск, Республика Беларусь

Антимонид индия (InSb) полупроводниковое соединение типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> с рекордно высокой подвижностью электронов, шириной запрещенной зоны 0,18 эВ при 300 К и 0,24 эВ при 0 К. На основе этого материала изготавливают широкий класс микроэлектронных приборов; высокочувствительные фотоэлементы, датчики Холла, оптические фильтры, инфракрасные детекторы, туннельные диоды. Для микроэлектронных изделий необходимо получение эпитаксиальных пленочных структур антимонида индия с высокой степенью кристаллического совершенства с использованием методов вакуумного осаждения. В данном исследовании применялся метод взрывного термического испарения, который основан на испарении в вакууме порошков подаваемых на испаритель, нагретый до температуры, позволяющей за миллисекунды переводить кристаллические частицы в пар [1].

Из литературных данных известно, что наилучшие результаты по подвижности носителей

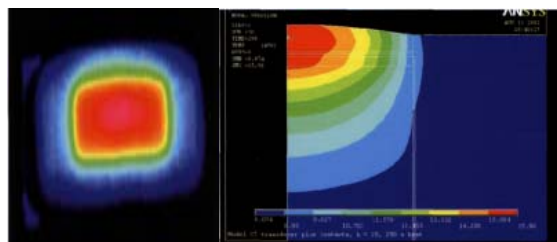


Рисунок 2 – Изображение и модель датчика

Таким образом, можно обеспечить безопасность ультразвуковых терапевтических излучателей, как на этапе разработки, так и в процессах производства и эксплуатации.

### Литература

1. Duck, F.A. Surface heating of diagnostic ultrasound transducers/ F.A. Duck, H.C. Starritt, G.R. ter Haar, tM. J. Lunt // The British Journal of Radiology. – 1989. – № 62. – С. 1005–1013.
2. Ультразвуковые физиотерапевтические аппараты и устройства: монография / Терещенко Н.Ф. Тимчик Г.С., Чухраев Н.В. Кравченко А.Ю. – Киев : КПИ им. Игоря Сикорского, Издательство «Політехніка», 2018. – 184 с.
3. Doody, C. Prediction of the temperature rise at the surface of clinical ultrasound transducers / C. Doody, H. Starritt, F. Duck // BMUS Bulletin. – 2003. – № 3. – С. 26–28.

и величине эффекта Холла достигаются при вакуумном эпитаксиальном росте пленок антимонида индия на полированных монокристаллических пластинах GaAs [2], [3], [4]. Такой тип подложек применялся и в данном исследовании. Известно, что рост текстуры тонких пленок антимонида индия на GaAs довольно сложный процесс, зависящий от температуры GaAs, температуры испарителя порошка, размера частиц порошка, его чистоты, скорости подачи порошка на испаритель [3].

Целью работы являлось исследование величины эффекта Холла, концентрации и подвижности носителей заряда, степени кристаллического совершенства пленок антимонида индия в зависимости от температуры подложки при осаждении их методом взрывного термического испарения. Пленки в дальнейшем предполагается использовать в датчиках Холла, углового поворота, давления и т. д.

Напыление антимонида индия проводилось на полированные подложки из арсенида галлия

через трафареты, что обеспечивало осаждение пленки в виде прямоугольника  $5 \times 10$  мм с контактными дорожками для соединения с золотыми контактными проводами. При этом температура испарителя составляла 1200-1500 °С, а температура нагревателя варьировалась от 370 до 430 °С. Интервалы этих температур были выбраны на основе обзора литературных данных [2], [3], [4], чтобы добиться высоких значений эффекта Холла и подвижности носителей. Толщина полученных пленок была в интервале 1,5-3,5 мкм.

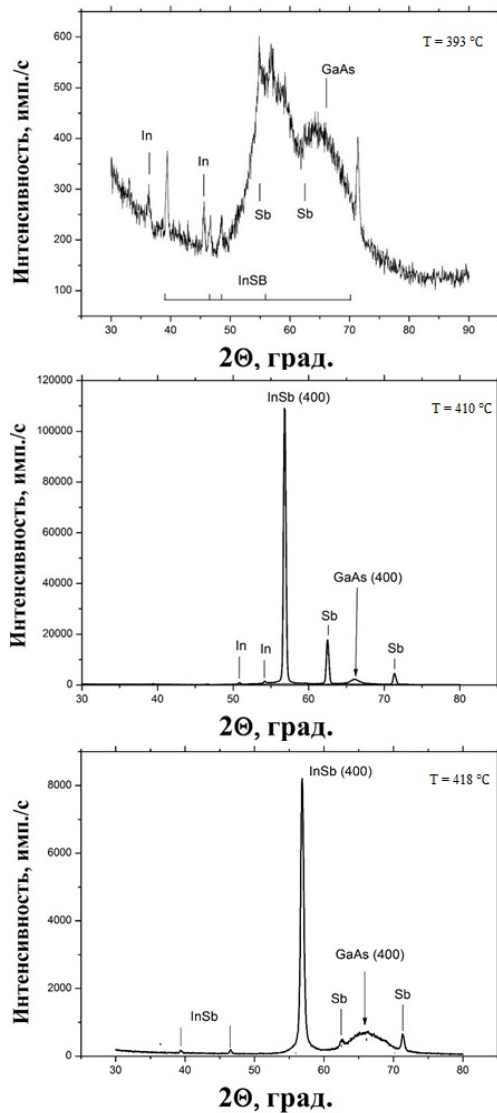


Рисунок 1 – Дифрактограммы плёнок антимонида индия, полученных при температуре подложки 393°С, 410°С и 418°С

Исследование кристаллической структуры осаждаемых пленок проводилось с помощью рентгеноструктурного анализа. Измерения температурной зависимости проводимости и эффекта Холла проводились на специальной установке, в которой через образец проходил постоянный ток, и поддерживалось постоянное магнитное по-

ле [1]. Интервал изменения температуры составлял 20–120 °С. Подвижность и концентрацию носителей определяли по известным формулам [1].

На основании дифрактограмм, представленных на рисунке 1, был определён интервал температур для получения плёнок с текстурированной кристаллической структурой.

Из представленных дифрактограмм следует, что при малых температурах осаждения фазовый состав плёнки представляет собой сумму фаз от поликристаллитов индия и сурьмы, а также соединения антимонида индия. Интенсивность дифракционных пиков сурьмы сравнима с интенсивностью антимонида индия. Для пленки, полученной при температуре подложки 410°С интенсивность дифракционного пика антимонида индия InSb (400) более чем в 10 раз больше по отношению к пику, который выделяется на дифрактограмме плёнки осажденной при большей температуре. При температуре осаждения выше, чем 410°С в плёнке формируются также кристаллиты соединения антимонида индия с направлениями отличными от (400). Таким образом, при температурах выше 400°С формируются плёнки антимонида индия, эпитаксиально выращенные и близкие к монокристаллическому строению антимонида индия.

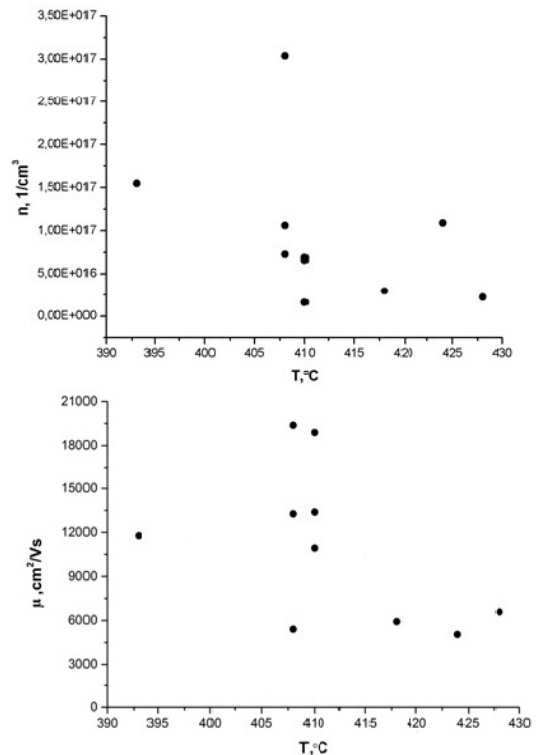


Рисунок 2 – Зависимость концентрации и подвижности носителей от температуры подложки

Исследования температурной стабильности для нескольких образцов, полученных при разной температуре подложки, показали, что темпе-

ратура подложки, составляющая 410 °С, является наиболее оптимальной для получения плёночных структур антимида индия.

Используя полученные данные измерения холловской разности потенциалов, для каждого образца были рассчитаны значения концентрации и подвижности носителей. На рисунке 2 приведены зависимости концентрации носителей и подвижности от температуры подложки, при которой были получены плёнки антимида индия. Из рисунка 2 следует, что температура подложки является основным фактором, определяющим магнитные и электрические свойства плёнок.

#### Заключение

Плёнки, осаждения которых происходит в интервале 405-410°С, обладают наибольшими значениями концентрации ( $10^{17}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) и подвижности ( $10$ - $15 \times 10^3$  см<sup>2</sup>/(В×с)) носителей, а падение напряжения Холла с ростом температуры не превышает 60 мВ на 100 °С. Также дан-

ные плёнки антимида индия, имеют наибольшую текстурированность в направлении (400).

#### Литература

1. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Том 1. М. : Советское радио, 1977
2. Гуляев А.М., Шитников А.С. Влияние избытка компонентов на электрические свойства пленок антимида индия // Физика и техника полупроводников, 2015. – № 2 (49). – С. 214–218.
3. M. Oszwaldowska, T. Berus, A. Borowska, M. Nowicka, A. Richter, K. Sangwal Textural properties of InSb thin films // Journal of Crystal Growth, 2004. № 265. – P. 83–93.
4. M. Oszwaldowska, T. Berus Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications // Thin Solid Films, 2006. – № 515. – P. 2692–2695.

УДК 631.22

## ПОРШНЕВЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Луговая И.С.

*Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь*

К числу высоковязких жидкостей в области сельскохозяйственного производства относятся органические удобрения, среди которых бесподстилочные органические удобрения представляют особую трудоемкость для транспортирования. Они состоят из экскрементов животных, остатков кормов и воды в виде технологических отходов. Бесподстилочные удобрения влажностью до 90% называют полужидким, до 93% – жидким, более 93% – разжиженным. Традиционные способы и соответствующие механические средства для транспортирования таких удобрений оказались нерентабельными. По этой причине механизацию выгрузки бесподстилочных удобрений и транспортировку по трубопроводам выполняют гидротранспортными установками. Они оборудованы насосами, которые осуществляют транспортировку по трубам на значительные расстояния от животноводческих помещений. Для перекачки удобрений высокой вязкости и пониженной влажности более эффективными оказались объемные насосы (поршневые и винтовые). Они предназначены для транспортирования навоза любой консистенции (влажностью не менее 78%), в состав которых входят: подстилочный материал в виде измельченной соломы (размером волокон до 100 мм), торф и другие материалы. Однако они отличаются более низкой производительностью по сравнению с центробежными насосами.

Для транспортирования удобрений используют мощные гидроцилиндры, у которых увеличено сечение загрузочной воронки. Гидропривод содержит обратный клапан на напорной линии трубопровода. Такая схема позволяет транспортировать высоковязкие жидкости любой консистенции и увеличить дальность транспортировки. В рабочей камере устройства установлен сферический клапан с острой кромкой, который позволяет легко разрезать соломистые материалы, облегчая транспортировку подстилочного удобрения по трубопроводу. Он приводится в движение от второго гидроцилиндра.

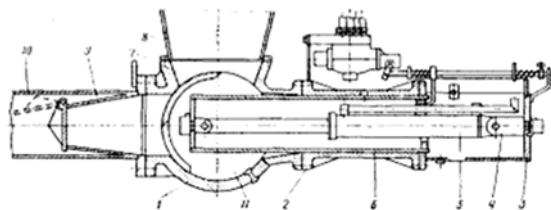


Рисунок 1 – Разрез поршневого насоса

Установка состоит из поршневого насоса (гидрогенератора), гидроприводной станции, двух гидрораспределителей P1 и P2, двух гидроцилиндров: привода поршня поршневого насоса установки Ц1 и привода сферического всасывающе-нагнетательного клапана Ц2. Поршневой насос (рис. 1) представляет собой гидравлическую машину объемного типа, которая

обеспечивает перемещение жидкости по трубопроводу при помощи поршня 6, совершающего возвратно-поступательное движение в направляющем переходнике (рабочем цилиндре) 2 и корпусе 1.

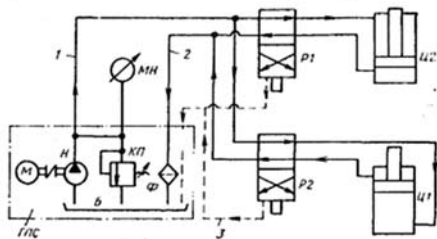


Рисунок 2 – Гидравлическая схема установки  
ГПС – гидроприводная станция; 1 – гидролиния силовая; 2 – гидролиния сливная; 3 – гидролиния дренажная

Очередность процессов всасывания и нагнетания внутри рабочей камеры 11 корпуса обеспечивает сферический всасывающе-нагнетательный клапан 7, который поочередно

соединяет рабочую камеру насоса с загрузочной воронкой и трубопроводом.

Привод всасывающе-нагнетательного клапана работает от отдельного гидроцилиндра. Автоматическое управление работой поршневого насоса обеспечивается двумя гидрораспределителями (рис. 2).

Принцип действия установки состоит в следующем. При движении поршня вправо клапан перекрывает полость трубопровода и соединяет рабочую камеру насоса с загрузочной воронкой. Под действием силы тяжести и разрежения удобрение из загрузочной воронки поступает в рабочую камеру. После ее заполнения клапан перекрывает окно горловины загрузочной воронки и открывает полость трубопровода. Поршень при движении влево, совершая рабочий ход, выталкивает порцию навоза в трубопровод.

#### Литература

Калекин А.А. Насосы для перекачивания навоза: справочник. М. : Изд-во МСХА, 1992. – 96с.

УДК 7.021.5

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В ЮВЕЛИРНОЙ ОТРАСЛИ

Луговой В.П.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время используют различные системы компьютерного проектирования, программы растровой и векторной графики, такие как SketchBook Pro, Alias, Product Design Suite (Autodesk), SolidWorks (SolidWorks Corp.), Rhinoceros (Robert McNeel & Associates), Matrix (Gemvision), nanoCAD (Нанософт), ZWCAD™ и ZW3D™ (ЗВСОФТ), Sculptris (Pixologic) и другие. Многие программы являются не только средой разработки 3D моделей (CAD системы), но также включают в себя автоматизированную (CAM) систему технологической подготовки производства: T-Flex (Топ Системы), Sprut-CAD/CAM (СПРУТ Технология), ArtCAM JewelSmith (Delcam), JewelCAD (Jewellery CAD/CAM Ltd) и др.). В тех случаях, когда функции программы ограничиваются созданием 3D модели, как например Компас 3D (Аскон) или 3D MAX (Autodesk), необходимо использовать дополнительное программное обеспечение в виде CAM модулей (Master CAM, Edge CAM, Art-Soft Mach, GeMMA-3D, Тиграс и т. п.) [1].

Технологии 3D печати позволяют получить не только прототип, но и само изделие на основе CAD файла, описывающего геометрию объекта, не прибегая к САМ-процессам. Подобная технология позволяет исключить трудоемкие операции на металлорежущих станках с подробной разработкой технологических маршрутных карт, не требуются заготовки. Данный способ получения деталей по компьютерной 3D-модели стали

называть технологией быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping).

Формирование изделия в аддитивных 3D технологиях начинается путем послойного наращивания материала по определенному закону.

В целом наибольшее применение находят 3D-принтеры, печатающие пластиком, для которой применяют порошковый полистирол для последующего литья по выжигаемым моделям, фотополимерные композиции. Например литье по выжигаемым моделям по технологии Quick-cast (дословно, «быстрое литье») или по технологии 3D печати с использованием многоструйных головок MJ (Multi Jet) для литья по выплавляемым моделям. При этом мастер-модели изготавливают из жидких, порошковых, нитевидных полимеров, литейного воска, листовых материалов – металлопроката, бумаги, ПВХ-пленки, гипсовых композиций, литейного песка. 3D-принтеры, печатающие пластиком, применяются не столько для изготовления готовых изделий, сколько для прототипов. Изначально технология 3D-печати так и называлась – быстрое прототипирование. 3D-принтеры позволяют изготавливать высокоточные прототипы деталей [1]. Применяют две технологии – лазерную и струйную

Вместе с тем в настоящее время в ювелирной сфере успешно зарекомендовала себя 3D технология печати металлом. Новые технологии 3D печати позволяют использовать стальные, алюминиевые, никелевые и медные сплавы, компо-



зиционные материалы, металлические порошки. Предполагается, что 3D-печать металлом представляет собой одно из наиболее перспективных технологий, которая может вытеснить современные методы прототипирования.

Для этой цели используют три основные технологии печати: SLA, SLS, FDM.

SLA – технология трехмерной печати с использованием сырья в виде жидкого фотополимера, который затвердевает под воздействием светового излучения лазера, образуя твердую поверхность в точке проекции лазера. При этом, как правило, платформа на которой возводится объект перемещается по заданным координатам. В емкость с жидким фотополимером с 17 % содержанием необходимого металла помещается сетчатая платформа, на которой происходит выращивание прототипа. Изначально платформа устанавливается на такой глубине, чтобы ее покрывал тончайший слой вещества. Далее включается лазер, воздействующий на полимер, вызывая затвердевание. После этого вся платформа погружается ровно на новый слой. По завершению построения объект погружается в специальный состав для удаления лишних элементов и полной очистки от липкого слоя, после чего происходит финальное облучение светом для окончательного отвердевания и придания текстуры и свойств металла. Преимуществом SLA-технологии 3D печати металлом является изготовление моделей любой сложности и толщины и высокая скорость создания объекта.

SLS-метод, похож на предыдущий, но вместо жидкофотополимера используется измельченный порошок с 50-78 % содержанием металла, который спекается лазером в точке контакта и наращивает тем самым структуру изготавливаемого объекта. Порошок наносится на поверхность платформы ровным слоем, после чего разглаживается специальным валиком. Процесс повторяется пока фигура не приобретет нужную форму и размеры. Печать проходит в специальной камере с бескислородной средой, в которой постоянно поддерживается высокая температура. Достоинством этого метода является разнообразие применяемых материалов и высокая проч-

ность изделий (на сегодняшний день в качестве сырья доступны нейлон, стекло, пластик, керамика, различные металлы). К недостаткам данной технологии следует отнести необходимость последующего обжига после печати, в специальной печи для окончательного спекания порошка, усадку детали после обжига на 8-10 %) от исходного объема и высокую стоимость принтера.

FDM-технология послойного наплавления путем непрерывной подачи материала через тонкое формовочное сопло на охлажденную платформу построения, где он застывает, слой за слоем формируя нужный объект. 3D-печать из металла способом наплавления рассматривается как самый простой из доступных ныне методов печати металлом. Достоинства данного метода: недорогое и распространенное сырье для печати (полимеры и пластик); широкая палитра цветов для печати [2].

Таким образом, анализ результатов показывает что, при помощи селективного лазерного спекания возможно «напечатать» не только модели и мастер модели, но и готовые металлические модели и металлические изделия, которые обладают высокой плотностью спекания (99.99 %); механические характеристики, сопоставимые для деталей, полученных литьем или механической обработкой. Полученный опыт работы показал, что метод спекания компонентов позволяет получить толщину слоя от 20 до 60 мкм в зависимости от используемого материала, изделия размером до 250×250×325 мм с толщиной слоя 20-40 мкм при скорости спекания 2-8 мм/с и мощности лазера 200-400 Вт.

#### Литература

1. А.П. Кушнир. Классификация 3D печати. Электронное научное издание: «Дизайн. Наука. Практика». М. : МГУПИ. – 2014, вып. 18. – С. 74.
2. И.Ю. Мамедова, М.А. Мартынов, Н.В. Коновалова. Перспективы 3д печати в ювелирном производстве и печати металлом в частности. Электронное научное издание. «Дизайн. Наука. Практика». М. : МГУПИ. – 2014, вып. 25. – С. 50.

УДК 616-77, 681.2

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИТИНОЛА

Савченко А.Л., Минченя В.Т., Соболев Д.Е.

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в Республике Беларусь имеется и все возрастает потребность в расходных материалах для сосудистой хирургии. Это связано с ростом сердечно-сосудистых патологий и появлением новых методик их лечения.

Такие методики связаны с использованием специальных эндопротезов и других изделий, выполненных из нитинола – стентов, стентграфтов, клапан-содержащих стентов, фильтров-ловушек и др. Все эти изделия представляют достаточно

сложные по форме пространственные структуры, получаемые гибкой из нитиноловой проволоки с использованием дополнительных операций сварки, соединения пластическим деформированием с помощью трубок. На настоящий момент такие изделия в Республике Беларусь практически не производятся, а иностранные образцы имеют крайне высокую стоимость, что делает операции с их использованием недоступным широким массам пациентов. Разработка технологии формообразования нитиноловых структур позволит внедрить их в производстве импортозамещающих аналогов медицинских изделий.

Анализ конструкций изделий медицинского назначения показал, что применение традиционных технологий при изготовлении элементов и деталей конструкций не всегда приводят к положительным результатам из-за особых свойств нитиноловых материалов. Так изготовление сложных зигзагообразных элементов для стентграфтов, требует предварительного формирования формы изгибов на специальных оснастках. На этих оснастках нитиноловая проволока должна быть натянута на множество выступов и затем произведена термообработка для формирования памяти формы. Из-за сверхупругости нитинола и значительного трения в зонах изгиба нитиноловой проволоки на выступах невозможно обеспечить равномерное натяжение проволоки. При обычном натяжении и дальнейшем отжиге при высокой температуре нитиноловая проволока теряет упругие свойства и проседает, при этом радиус изгиба увеличивается.

Применение метода предварительного охлаждения приспособления и нитиноловой проволоки, частично решает задачу обеспечения копирования приспособления. Если приложить небольшое механическое усилие, изделию из нитинола в охлажденном мартенситном состоянии можно придать любую конфигурацию. Она будет сохраняться до тех пор, пока предмет не нагреют до температуры начала аустенитного превращения, и в процессе нагрева до температуры завершения аустенитного превращения нитинол не перейдет в аустенитную фазу, полностью восстанавливая прежнюю форму и реализуя при этом эффект памяти формы. Однако при сложных конструкциях и малых радиусах изгиба, а также большого числа изгибов из-за трения в зонах контакта нитинол-выступ приспособления невозможно обеспечить хорошее и надежное копирование заданной приспособлением формы.

Нами разработано ультразвуковое устройство, с помощью которого при предварительном натяжении на нитиноловую проволоку подаются ультразвуковые колебания.

Устройство для гибки и термообработки каркаса стентграфта показано на рис. 1.

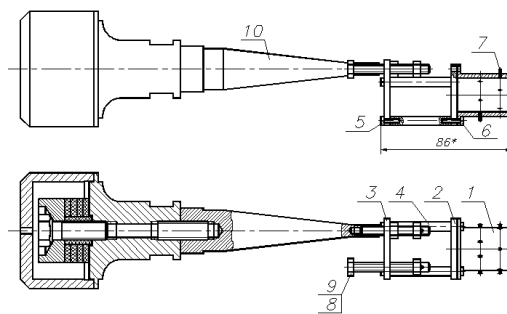


Рисунок 1

Устройство включает оправку 1 диаметром 28 мм с установленными на ней штифтами 7. Оправка крепится на пластине 2, которая соединена с пластиной 3 стойками 4 с винтами 5.

На оправку навивается зигзагообразный каркас из нитиноловой проволоки. Концы проволоки пропускаются в отверстия пластины 2 и фиксируются в отверстиях болтов 8 гайками 9. Затем с помощью болтов 8 проволока натягивается, и приспособление устанавливается в печь для термообработки.

При натяжении проволоки она возбуждается ультразвуковыми колебаниями от преобразователя 10.

Устройство выполнено на основе ранее использовавшегося приспособления (рис. 2) [1].

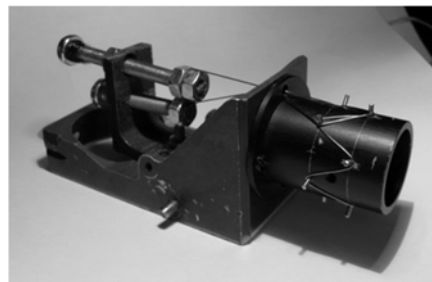


Рисунок 2

Для исследования были взяты образцы проволоки Ti-44,48; Ni-49,16; Cu-6,02 фирмы «Фукава» (Япония) диаметром 0,36 и 0,45 мм, используемой для изготовления каркасов стентграфтов. Проволока подвергалась ультразвуковому воздействию в диапазоне частот 22...26 кГц непосредственно на приспособлении (рис. 1). В ходе исследований было установлено следующее.

Изгибная жесткость образцов из нитиноловой проволоки непосредственно после ультразвукового возбуждения в резонансном режиме не отличается от жесткости исходных образцов. Тем не менее, изгибная жесткость в процессе возбуждения ниже на 30...40 %, что способствует получению минимальных радиусов изгиба.

При ультразвуковом воздействии резко снижаются силы трения в зонах контакта проволоки и оснастки, и повышается точность копирования изгибов на выступах, так как нитиноловая проволока при воздействии ультразвука хорошо копирует приспособления и при отжиге сохраня-

ет свою заданную на приспособлении форму. Таким образом применение ультразвука эффективно при формировании сложных форм нитиноловых изделий, таких как зигзагообразных с большим количеством изгибов, крючков с малыми радиусами изгиба и др.

По результатам исследований разработан технологический процесс формирования изогнутых форм, где в качестве одной из основных операций применяется описанный выше метод формообразования с ультразвуком. Объектом технологического процесса является элемент каркаса стентграфта (стент-элемент) из нитиноловой проволоки марки *ASTM F2063* диаметром 0,23 мм (рис. 3).

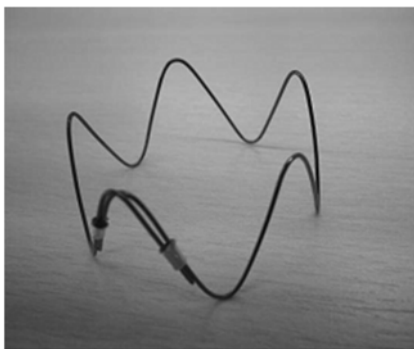


Рисунок 3

Для навивки и натяжения проволоки с ультразвуком используется специально разработанное приспособление, показанное на рис. 4.

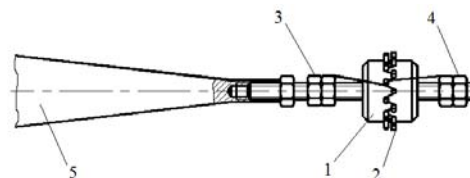


Рисунок 4

Проволока навивается на цилиндрическую оправку 1 и огибает штифты 2 заданного радиуса гибки. Оправка крепится на концентратор ультразвукового преобразователя таким образом, чтобы место соединения располагалось в узле, а плоскости крепления штифтов – в максимуме стоячей волны. После этого проволока при включенных ультразвуковых колебаниях натягивается гайками 3 и 4 с последующим законтриванием. После затяжки контргайки ультразвуковой преобразователь отсоединяется.

#### Литература

1. Разработать оригинальную конструкцию системы аортального стентграфта и внедрить технологию применения системы аортального стентграфта для хирургического лечения аневризм грудной аорты при операциях с искусственным кровообращением : отчет о НИР (заключительный) : ГБ 03.08-1/2011/ кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченя В.Т., исполн. Минченя Н.Т., исполн. Савченко А.Л., исполн. Степаненко Д.А. – Электрон. дан.. – Минск : [б. и.], 2013. – N ГР 20113925.

УДК616-77,681.2

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УПРУГО-ЭЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОСУДОВ

Минченя В.Т.<sup>1</sup>, Савченко А.Л.<sup>1</sup>, Адзерихо И.Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусская медицинская академия последипломного образования, Минск, Республика Беларусь

Как известно [1], окклюзионно-стенотические поражения магистральных артерий крупного и среднего калибра, наблюдающиеся при таких заболеваниях как, облитерирующий атеросклероз нижних конечностей, ишемические формы синдрома диабетической стопы при сахарном диабете, приводят к снижению качества жизни и ранней инвалидизации.

Следует отметить, что при выше указанных заболеваниях происходят значительные изменения артериальной стенки, причем при атеросклерозе ремоделирование проявляется в виде утолщения интимы артерий и изменении состава внеклеточного матрикса, что создает локальные препятствия кровотоку.

Предлагается впервые в мировой практике изучить влияние внутрисосудистого ультразвукового воздействия на повышение эластич-

ности артериальной стенки при атеросклерозе и сахарном диабете. Для этого также впервые в мировой практике предлагается трубчатая катетерно-волноводная система для воздействия на сосудистые образования и артериальную стенку.

Целью работы является исследование влияния ультразвуковых колебаний на упруго-эластические свойства артериальной стенки.

Ход экспериментальных исследований был следующим.

1. Измеряются геометрические и упруго-эластические параметры образца.

2. Осуществляется воздействие на образец: ультразвуковыми колебаниями, создаваемых волноводом трубчатого типа, с различными параметрами колебаний; струей физиологического раствора, подаваемого в зону воздействия через внутренний канал волновода и распыляемого через отверстия в

головке (здесь исследуется действие струи на стенки сосудов); сочетанное воздействие.

3. После выполнения п.2, производится измерения геометрических и упруго-эластических параметров образца.

Экспериментальные исследования осуществлялись в лаборатории БелМАПО при участии к.м.н. Чура Сергея Николаевича.

На фантом в процессе исследований осуществлялось ультразвуковое воздействие полым волноводом, размещаемым внутри фантома в непосредственной близости от баллонного катетера. При этом в баллоне создавалось давление до 4 МПа. Ультразвуковое воздействие осуществлялось в виде пакетов колебаний с параметрами, позволяемыми используемым генератором.

В ходе исследований регистрировались колебания давления в баллонном катетере при различных условиях (в свободном состоянии и при ультразвуковом воздействии). Ниже приведены усредненные и частично обработанные результаты измерений давления.

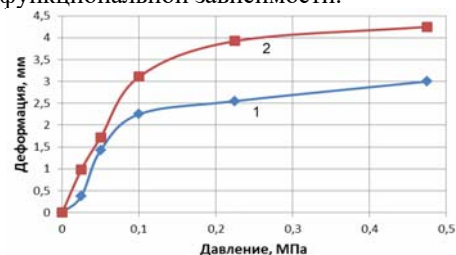
Как видно из рисунка 1, в результате обработки сегмента «мягкого» сосуда ультразвуком в течение 10 мин происходит существенное снижение его жесткости по отношению к сильнодеформирующим нагрузкам. Ввиду того, что исходно сосуд является «мягким» степень деформации под действием относительно небольшой силы оказывается значительной, достигающей 33–40 % для сосуда в исходном состоянии и 47–52 % после 10-минутного УЗ воздействия. При этом на уровне незначительных (обратимых) деформаций достоверных различий между исходным и обработанным сегментом сосуда не выявлено.

Из данных, приведенных на рисунке бб, следует, что 10-минутное УЗ воздействие вызывает повышение относительной деформации сегмента «мягкого» сосуда в 1,4 раза по отношению к нагрузке 0,1 н и в 1,3 раза как при большей, так и при меньшей нагрузке.

Несколько неожиданным является тот факт, что столь сложный процесс ультразвуковой обработки сосуда, в определенных случаях (а именно, для сегмента «мягкого» сосуда, подвергнутого 10-минутной обработке), описывается с весьма высокой точностью достаточно простой степенной зависимостью от внешней нагрузки.

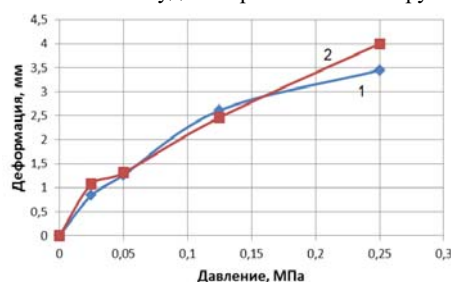
На основании этих фактов можно предположить, что 10-минутная УЗ обработка сегмента сосуда действует усредняющее, снижая количество факторов, влияющих на механические свойства стенок сосуда. Можно ожидать, что в случае необработанного сосуда имеет место два или несколько различных факторов, определяющих его деформируемость в зависимости от приложенной нагрузки (при малых нагрузках это может быть обратимая деформация адвентиции, затем при больших – необратимое разрушение хрупких

кальциевых структур в меди, далее сопровождающееся обратимой деформацией в слое меди). После обработки сосуда достаточно длительное время (10 мин) ультразвуком, вероятно, кальциевые структуры разрушаются, и остается один из факторов, определяющих упругие свойства сосуда. В результате, зависимость деформации от нагрузки приобретает «плавный», без скачков, связанных с необратимым разрушением кальциевых структур, характер и описывается одним видом функциональной зависимости.



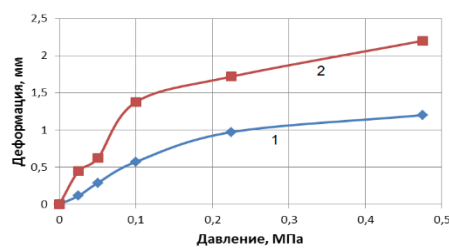
1 – исходный сосуд, 2 – после действия ультразвука в течение 10 мин,

Рисунок 1 – Зависимость деформации сегмента «мягкого» сосуда от приложенной нагрузки



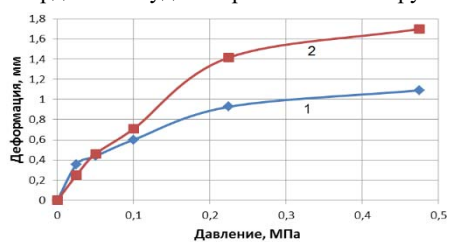
1 – исходный сосуд, 2 – после действия ультразвука в течение 2 мин

Рисунок 2 – Зависимость деформации сегмента «мягкого» сосуда от приложенной нагрузки



1 – исходный сосуд, 2 – после действия ультразвука в течение 10 мин

Рисунок 3 – Зависимость деформации сегмента «твердого» сосуда от приложенной нагрузки



1 – после действия ультразвука в течение 5 мин, 2 – исходный сосуд

Рисунок 4 – Зависимость деформации сегмента «твердого» сосуда от приложенной нагрузки

При уменьшении времени воздействия ультразвука до 2 мин ситуация существенно изменится. Как видно из рисунка 2, наблюдается лишь незначительный эффект для самых малых деформаций (обусловленный, по-видимому, обратимой деформацией в адвентиции, на которую непосредственно действует внешнее давление) и несколько более выраженное действие при больших нагрузках. В целом, можно сделать вывод, что столь кратковременное УЗ воздействие не является эффективным.

В результате 10-минутного воздействия ультразвука на сегмент «твердого» сосуда степень его деформируемости повышается как для низких, так и для высоких нагрузок (рисунок 3).

Характерно, что в результате 10-минутного УЗ воздействия величина «несжимаемой» части сосуда снижается в 1,3 раза.

Снижение времени УЗ обработки до 5 мин приводит к заметно менее выраженному эффекту – лишь для достаточно высоких уровней нагрузки относительная деформация снижается в 1,2 раза.

Дальнейшее уменьшение времени УЗ обработки (до 1 мин) не приводит к статически достоверным изменениям в механических свойствах «твердых» сосудов (рисунок 4).

### Литература

1. Клиническая ангиология. Под ред. Покровского А.В. – М. : Медицина, 2004. – Т. 1. – 808 с.

УДК 617-7

## УСТРОЙСТВО ИСПЫТАНИЯ ОЧКОВЫХ ОПРАВ

Киселев М.Г., Габец В.Л., Мониц С.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Оправа – устройство для фиксации линз в заданном положении. Она представляет собой устройство для фиксации линз. Ее задачей является обеспечение правильного положения линз перед глазами. Идеальным считается положение, при котором средняя линия световых проемов (световой проем есть пространство, ограниченное ободком оправы) проходит примерно через центры зрачков или несколько ниже [1-3].

На оправы корригирующих очков, считающиеся изделиями медицинской техники, распространяется ГОСТ 31589-2012 «Оптика офтальмологическая. Оправы корригирующих очков. Технические требования».

Испытание очковых оправ на механическую прочность проводится согласно ГОСТ Р 51932-2002.

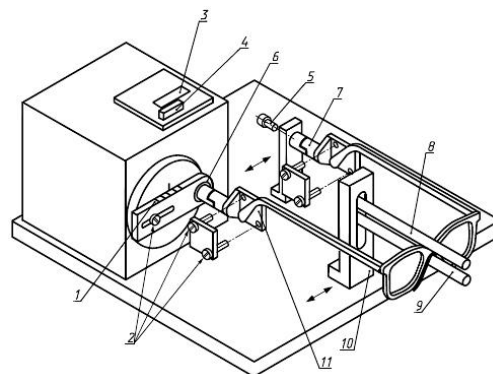
Принципиальная схема устройства для проверки механической прочности оправы приведены на рисунке 1.

Измерительное устройство состоит из двух зажимов 11 для удержания заушников, установленных на универсальных шарнирах 7 (рисунок 1), и узла поддержки моста 9. Узел поддержки моста 9 состоит из стержня диаметром  $(10 \pm 1)$  мм с жесткой металлической пластиной толщиной  $(1 \pm 0,5)$  мм. Взаимное расположение зажимов 11 и узла поддержки моста 9 допускает регулировку в пределах 40 мм по горизонтали и вертикали.

Диапазон перемещения подвижного зажима 11 составляет:

- вниз -  $(30 \pm 0,5)$  мм; в сторону -  $(60 \pm 1,0)$  мм;
- вверх -  $(30 \pm 0,5)$  мм с частотой до 40 циклов в минуту.

Фотография общего вида созданного устройства для проверки механической прочности оправы и описание конструкции приводится по рисункам 2.



- 1 – шкала амплитуды смещения оправы;
- 2 – крепежные винты; 3 – окно счетчика;
- 4 – контрольный выключатель; 5 – фиксирующий винт;
- 6 – шариковый подшипник; 7 – универсальный шарнир;
- 8 – регулируемый ограничитель моста;
- 9 – регулируемый узел поддержки моста;
- 10 – регулируемая стойка для различных размеров очковых оправ; 11 – подвижный зажим

Рисунок 1 – Общий вид и конструкция зажимов устройства для проверки прочности оправы:

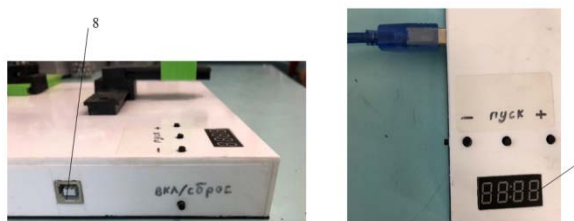


Рисунок 2 – Фотография панели расположения кнопок на устройстве для проверки механической прочности оправы

Оно состоит из основания 1, в котором располагается электронный блок управления приводом стэнда и на котором находятся два зажима 2 для удержания заушников, установленных на универсальных шарнирах 3, и узла поддержки

моста 4. Узел поддержки моста 4 состоит из стержня 5 диаметром  $(10 \pm 1)$  мм с жесткой металлической пластиной 6 толщиной  $(1 \pm 0,5)$  мм. Взаимное расположение зажимов 2 и узла поддержки моста 4 допускает регулировку в пределах 40 мм по горизонтали и вертикали. Кроме того, на основании 1 устройства располагается панель управления стендом (рисунок 2), включающая четырехрядный ЖК-дисплей 7 и кнопки «ПУСК», «+» и «-». Сбоку основания располагается гнездо 8 для подключения стенда к USB-порту компьютера (для питания).

Испытание на деформацию очковых оправ проводятся согласно ГОСТ Р 51932-2002.

Испытание на деформацию моста проводят на испытательной установке, схема которой приведена на рисунке 3.

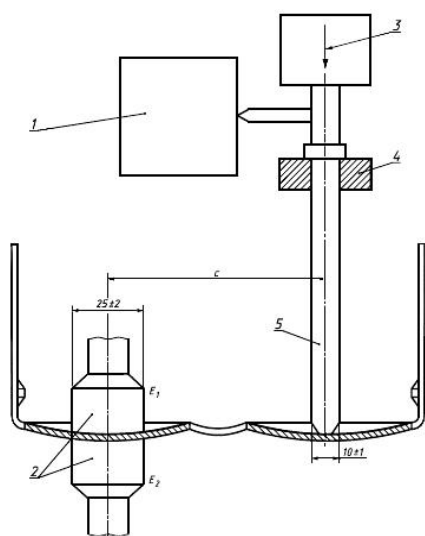


Рисунок 3 – Схема испытательного устройства:  
1 – измерительный прибор; 2 – кольцевая трубочина;  
3 – направление и точка приложения силы (наибольшая - 5 Н); 4 – направляющее кольцо;  
5 – давящий штырь; E1 и E2 – контактные поверхности

Линейный измерительный прибор 1 – с точностью измерения не менее 0,1 мм. Вертикально установленная кольцевая трубочина 2 должна обеспечивать фиксацию оправы без ее перекручивания и/или скольжения. Кольцевая трубочина 2 имеет диаметр  $(25 \pm 2)$  мм и две контактные поверхности, изготовленные из стойкого эластичного материала, например полиамида.

Давящий штырь 3 имеет диаметр  $(10,0 \pm 1,0)$  мм. Опорный конец давящего штыря 3 выполнен в виде полусферы. Контактные поверхности трубочины 3 могут смещаться относительно горизонтальной оси испытательной установки на  $\pm 10$  мм. Давящий штырь 3 смещается относительно горизонтальной оси на плюс 10, минус 8 мм. Расстояние между трубочиной 2 и давящим штырем 3 должно быть регулируемым.

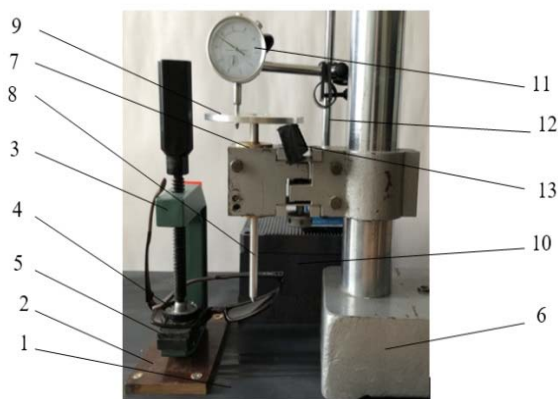


Рисунок 4 – Фотография испытательного стенда

1. Закрепить испытуемый образец на установке за геометрический центр линзы с допустимым отклонением 2 мм; при этом передняя часть оправы 4 должна быть направлена вниз.

2. Опустить давящий штырь 8 так, чтобы он находился на задней поверхности незакрепленной линзы в пределах 2 мм от ее геометрического центра, и убедиться в том, что не происходит смещения линзы. Записать данный результат как начальную позицию.

3. Затем медленно и плавно опустить давящий штырь 8 вниз, приложив силу не более 5 Н на расстоянии  $(10 \pm 1,0)\%$  от расстояния между центрами линз. Требуемый вес от (2Н до 5Н) набрать с помощью набора гирь 1, учитывая, что вес давящего штыря 8 составляет 1 Н.

4. Если наибольшая сила 5 Н недостаточна для смещения давящего штыря на требуемое расстояние, продолжить испытание, записав значение смещения.

5. Воздействие давящего штыря продолжать в течение 5 с, затем отвести давящий штырь вверх, чтобы он не касался линзы. После перерыва в течение 20 с вновь опускать давящий штырь до тех пор, пока он не соприкоснется с линзой.

6. Определить смещение давящего штыря от его начальной позиции и рассчитать деформацию  $\varphi$ , %, по формуле:

$$\varphi = \frac{x}{c} \cdot 100\% ,$$

где  $x$  – смещение давящего штыря, мм;  $c$  – расстояние между центрами линз, мм.

После испытания провести осмотр образца. Оправу считают выдержавшей испытание, если после испытания на ней нет трещин и поломок.

#### Литература

1. Розенблюм Ю.З. Выбор оправы // Веко. 2001. № 5. С. 44–45.
2. Langermann S. Materialien von Metallbrillenfassungen // Focus. 2008. N 11. S. 45.
3. Sonnenberg F. Brillen-alternativen fuer Kinder mit Kontaktallergien // Focus. 2012. N 5. S. 44.

УДК 620.1.05

## УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ГОЛОВКИ ЗУБНЫХ БОРОВ БЕСКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

Киселев М.Г., Габец В.Л., Монич С.Г.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Зубные боры предназначены для препарирования твердых тканей зубов и челюстных костей. Бор (рисунок 1) состоит из рабочей части (головки) 1, шейки 2 и хвостовика 3, служащего для закрепления бора в стоматологическом наконечнике. Где  $d_1$  – диаметр рабочей части, диаметр головки;  $d_2$  – диаметр шейки;  $L_1$  – длина рабочей части, длина головки;  $L_2$  – общая длина.

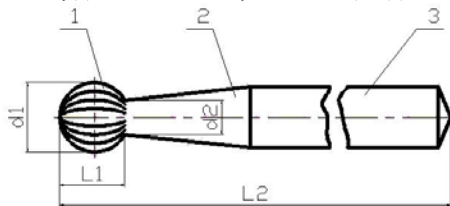


Рисунок 1 – Бор

Испытания зубных боров проводятся по методикам, изложенным в ГОСТ 30213-94 «Инструменты стоматологические вращающиеся. Методы испытаний» [1].

Для измерения общего радиального биения  $t$  (рисунок 3а) следует пользоваться специальным стендом, состоящим из удерживающего устройства (призмы) (рисунок 3б) и индикатор циферблатного типа с точностью измерения 0,01 мм.

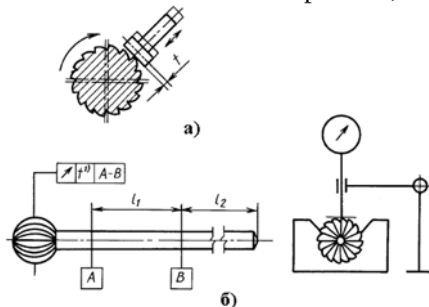


Рисунок 3 – Определение общего радиального биения  $t$  рабочей части (головки) бора – а; схема измерения общего радиального биения рабочей части бора – б

На рисунке 4 показано определение общего радиального биения  $t$  шейки бора, а также схема измерения общего радиального биения шейки бора.

Радиальное биение зубных боров проверяют на шейке на расстоянии 1 мм от рабочей части.

Методика проведения испытания:

Установить инструмент в удерживающее устройство и медленно повернуть вдоль продольной оси на  $360^\circ$ . Записать минимальное и максимальное показания. Вычислить разницу этих значений и записать ее в качестве значения общего радиального биения.

На рисунке 5 приведена фотография устройства для измерения радиального биения боров и алмаз-

ных головок, разработанного на кафедре «Конструирование и производство приборов» БНТУ.

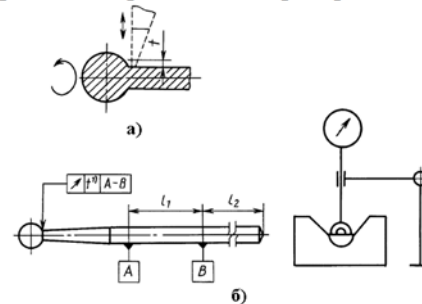


Рисунок 4 – Определение общего радиального биения  $t$  шейки бора – а; схема измерения общего радиального биения шейки бора – б

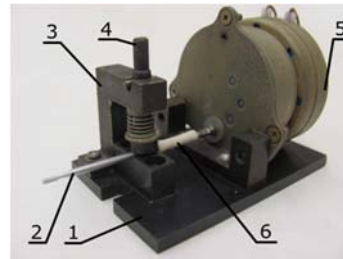


Рисунок 5 – Фотография устройства для измерения радиального биения боров и алмазных головок

Оно состоит из стального основания 1, на котором закреплена призма 3 с пружинным прижимом 4 и электродвигатель 5. С валом электродвигателя посредством эластичной муфты 6 связан хвостовик испытуемого бора 2, который установлен в призме и прижат к ней с помощью прижима. Электродвигатель подключен к сети переменного тока напряжением 220В через кнопочный выключатель. При замыкании цепи медленное вращение вала через эластичную муфту передается испытуемому бору, установленному в призме.

Для измерения радиального биения в данном случае, в отличие от стандартной методики (рисунок 3), будем применять бесконтактный метод, основанный на использовании малого инструментального микроскопа МИМ-5. Методика измерения радиального биения бора или алмазной головки заключается в следующем. Испытуемый инструмент устанавливается в призму устройства и посредством эластичной муфты связывается с валом электродвигателя, после чего фиксируется в призме прижимом. Затем устройство 1 устанавливается на стол 2 микроскопа (рисунок 6) таким образом, чтобы продольная ось бора или головки совпадала или была параллельна оси продольного перемещения стола микроскопа.



Рисунок 6 – Фотография устройства для измерения радиального биения боров и алмазных головок, установленного на столе микроскопа

Для этого, путем регулировочных перемещений устройства на столе микроскопа необходимо добиться того, чтобы продольная ось бора или алмазной головки располагалась параллельно горизонтальной линии на окуляре микроскопа (рисунок 7), т. е. параллельно продольной оси перемещения его стола.

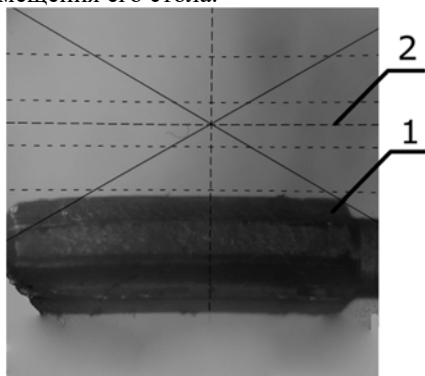


Рисунок 7 – Положение устройства на столе микроскопа, при котором ось испытуемого инструмента расположена параллельно продольной оси перемещения измерительного стола микроскопа. 1 – испытуемый инструмент; 2 – горизонтальная линия сетки окуляра микроскопа

После этого, за счет соответствующих перемещений стола с помощью микровинтов его продольной и поперечной подач установить испытуемый бор в положение, при котором горизонтальная линия сетки окуляра будет касаться выступающей части головки бора или алмазной головки (рисунок 8).

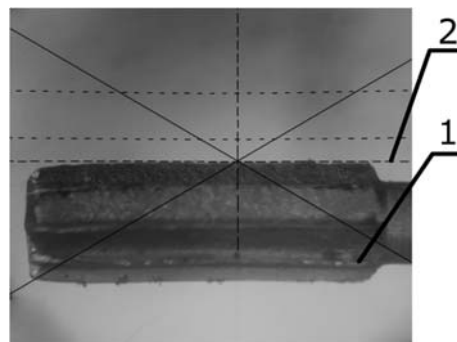


Рисунок 8 – Положение бора в начальный момент процедуры измерения радиального биения его головки. 1 – головка бора; 2 – горизонтальная линия сетки окуляра микроскопа

В этом положении снять показания на микровинте поперечной подачи стола микроскопа (цена деления микровинта составляет 5 мкм). Затем включить кнопочный выключатель цепи питания электродвигателя устройства. Наблюдая в окуляр микроскопа положение выступающей части головки бора при его медленном вращении, отключить привод в тот момент, когда положение выступающей части головки бора отклонится от исходного. Затем путем вращения микровинта поперечной подачи стола микроскопа вновь совместить горизонтальную линию сетки окуляра микроскопа с выступающей частью головки бора и снять отсчет показаний микровинта. Эту процедуру следует повторить несколько раз за полный оборот бора. Величина радиального биения его головки будет соответствовать максимальной разности показаний микровинта за один оборот испытуемого бора или алмазной головки. Полученное значение радиального биения головки бора занести в протокол испытаний.

#### Литература

1. ГОСТ 30213-94 «Инструменты стоматологические вращающиеся. Методы испытаний».
2. Линда Р. Бартоломуччи Бойд Стоматологические инструменты. МЕДпресс-информ, 2007.
3. Трезубов В.Н. Стоматологический кабинет: оборудование, материалы, инструменты. СПб, 2006.

УДК 620.1.05

### УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЕМКОСТИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖИДКОСТЯМИ

Киселев М.Г., Мониц С.Г., Антонов М.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Емкость поверхности твердого тела является важным эксплуатационным показателем, характеризующим способность ее микрорельефа удерживать определенный объем данной жидкости. В частности, для поверхностей пар трения, работающих в условиях граничной смазки, в качестве такого показателя используется маслоемкость их

микрорельефа, и чем она выше, тем лучше условия работы фрикционного сопряжения [1].

В настоящее время для определения маслоемкости поверхности трения используются два способа. Один из них [2], заключается в том, что на исследуемую поверхность трения наносят дозированную каплю масла и раскатывают по



исследуемой поверхности с помощью ролика. По толщине масляного пятна, полученного после прокатки, определяют степень маслосмекости поверхности. Однако этот способ весьма неточен, так как невозможно абсолютно точно дозировать каплю масла и обеспечить постоянное усилие прижатия ролика по всей контролируемой поверхности, что сказывается на площади отпечатка, а следовательно, на толщине пленки.

Второй способ [3] основан на определении скорости самопроизвольного растекания масляного пятна, образующегося между исследуемой поверхностью и прозрачной пленкой с отверстиями и делениями, прижатой к ней. В этом случае на исследуемую поверхность 1 (рисунок 1а) накладывается прозрачная пленка 2 и прижимается к ней.

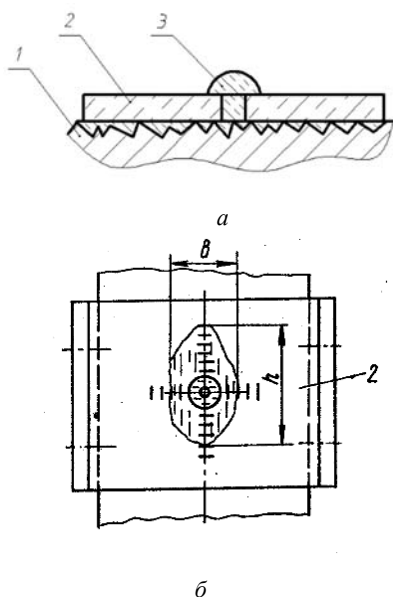


Рисунок 1 – Способ определения маслосмекости поверхности с помощью прозрачной пленки

На отверстие в пленке диаметром 1-1,5 мм наносится капля масла 3 и в этот момент засекается время. По истечении времени  $t$ , фиксируются размеры масляного пятна  $h$  и  $B$  (рисунок 1б) с помощью делений, нанесенных на пленке. Скорость растекания масла рассчитывается по формуле:

$$\theta = \frac{h \cdot B}{t},$$

где  $h$  и  $B$  – размеры масляного пятна, мм;  $t$  – время от начала растекания масла до момента определения размеров масляного пятна, с.

Такой способ использовался авторами [1] при выборе оптимального метода технологической обработки поверхности трения, при котором на ней формируется микрорельеф, обеспечивающий наибольшее значение скорости растекания масла между двумя сопрягаемыми поверхностями. Однако ему, как и первому способу определения маслосмекости поверхности, которые являются

косвенными, присущи недостатки, связанные с неточностью измерения параметров получаемого на ней масляного пятна, а также трудностями обеспечения постоянных условий выполнения измерений, в частности, усилия прижатия прозрачной пленки к испытуемой поверхности, что существенно влияет на скорость самопроизвольного растекания масла между ними.

Для устранения указанных недостатков необходимо решить две взаимосвязанные задачи: реализовать возможность прямого измерения массы, а соответственно, объема жидкости на исследуемой поверхности для чего обеспечить постоянные условия их взаимодействия без использования дополнительного контролера в виде ролика или пленки.

Исходя из этого, авторами данной статьи предложена методика определения емкости поверхности, основанная на прямом измерении массы жидкости, оставшейся на ней, после выполнения процедуры вибрационного встряхивания.

В ходе ее проведения на жидкость, предварительно нанесенную на неподвижную испытуемую поверхность, действуют с одной стороны вибрационная сила  $F_v$  и сила тяжести  $mg$ , стремящаяся удалить ее с колеблющейся поверхности, а с другой – сила ее поверхностного натяжения  $F_n$ , обеспечивающая ее удержание на ней.

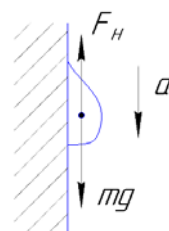


Рисунок 2 – Схема, сил действующих на каплю на поверхности твердых тел при вибростраивании

Запишем условие равенства этих сил ( $mg + F_v = F_n$ ) в виде:

$$m \cdot g + m \cdot \omega^2 \cdot A = \alpha \cdot l, \quad (1)$$

где  $m$  – масса объема жидкости, на испытуемой поверхности, кг;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$  – угловая частота колебаний, рад<sup>-1</sup>;  $A$  – амплитуда колебаний испытуемой поверхности, м;  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;  $l$  – длина границы раздела между жидкостью и испытуемой поверхностью, м.

Выразив в уравнении (1) массу жидкости через ее объем  $V$  и плотность  $\rho$  ( $m = \rho V$ ), получим выражение для определения объема оставшейся на исследуемой поверхности жидкости после выполнения процедуры центрифугирования:

$$V = \frac{\alpha \cdot l}{\rho \cdot (g + 4 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot A)} \quad (2)$$

Из его анализа следует, что при неизменных параметрах  $\omega$  и  $A$  проведения процедуры центрифугирования и постоянных для данной жидкости значениях  $\rho$  и  $\alpha$ , емкость исследуемой поверхности  $V$  будет зависеть только от длины границы раздела между ней и жидкостью. В свою очередь, ее величина определяется микрорельефом исследуемой поверхности. Данное положение дает принципиальную возможность оценивать влияние параметров шероховатости поверхности, а следовательно, применяемых при их формировании методов и режимов обработки, на ее емкость при взаимодействии с той или иной жидкостью. Следует подчеркнуть, что предлагаемая методика позволяет проводить только сравнительную оценку емкости данной поверхности по отношению к абсолютно гладкой, которой может служить полированная поверхность, обладающая минимальным значением емкости.

Предлагаемая методика определения емкости поверхности предусматривает последовательное выполнение следующих действий: измерение начальной массы образца  $m_1$  с исследуемой поверхностью, установку образца в приспособление для вибрационного встряхивания, погружение исследуемого образца в жидкость и его извлечение, фиксация образца, выполнение процедуры вибростраивания, снятие образца и измерение его конечной массы  $m_2$ . Приращение массы образца ( $\Delta m = m_1 - m_2$ ) соответствует массе жидкости, удержанной на его исследуемой поверхности. Зная плотность жидкости  $\rho$  и  $\Delta m$ , вычисляется ее объем  $V$ , который определяет емкость данной поверхности.

На рисунке 3 представлена схема, поясняющая процедуру проведения вибростраивания. Для ее выполнения используется электромагнит 1, установленный в вертикальном положении сердечником вверх. На нем неподвижно устанавливается стол 2, а к нему посредством стойки 3 фиксируется на постоянном магните 4 предварительно взвешенный образец 5.

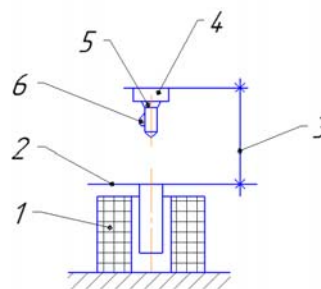


Рисунок 3 – Схема, поясняющая процедуру проведения вибростраивания

При выключенном электромагните 1 образец 5 погружается в жидкость 6, после чего он извлекается из нее и фиксируется на стойке 3. После этого включается электромагнит 1 с фиксированной частотой колебаний 2 Гц и амплитудой 5 мм. По истечении 5 секунд работы электромагнита на этой частоте, он отключается, образец снимается с постоянного магнита и взвешивается. В результате выполнения этой процедуры излишки жидкости с исследуемой поверхности образца удаляются, а оставшаяся ее часть в виде тонкого слоя задерживается на ней. Объем этой части жидкости характеризует емкость исследуемой поверхности, соответствующую данным условиям ее вибростраивания.

#### Литература

1. Морозенко Б.Н., Проволоцкий А.Е., Андреев Б.И., Пасько Л.П. Определение маслосъемности поверхностей трения. «Вестник машиностроения», 1974, № 2. – С. 48–49.
2. Радионенко А.В. Способ определения маслосъемности поверхности трения. Патент SU 985549. Оpubл. 30.12.1982.
3. Киселев М.Г., П.О. Корзун, Т.П. Павич. Определение вида микрорельефа обработанной поверхности, обеспечивающего ее наибольшую площадь и объем при контактировании с жидкостью. «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого» № 4. – Гомель, 2009. – С. 40–52.

УДК 620.1.05

### КОМПЛЕКС УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПРОЧНОСТИ ТРУБКИ ИНЪЕКЦИОННЫХ ИГЛ

Киселев М.Г., Мониц С.Г., Кучинская О.В., Аншиц А.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Иглы для инъекций (подкожных) внутримышечных и внутривенных представляют собой металлическую трубку (из нержавеющей стали 12Х18Н10Т) различного диаметра и длины (рис. 1).

Игла состоит из трубки 1 и головки 2. Один конец иглы, предназначенный для проникновения в ткани, остро заточен и называется острием иглы. Другой конец, который насаживается

на подыгольный конус шприца, называется канюля (головка иглы).

В зависимости от внутреннего диаметра и длины выпускаются инъекционные иглы разных размеров – 0415, 0420, 0520, 0840, 1060. Первые две цифры обозначают внутренний диаметр иглы в мм, увеличенный в 10 раз, две последние цифры – длина иглы в мм.

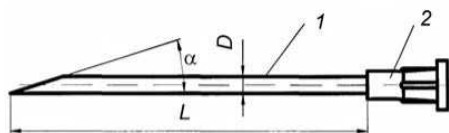


Рисунок 1 – Основные элементы инъекционной иглы

Диаметр иглы определяется вязкостью вводимого лекарственного вещества. Для введения масляных растворов и крови используются иглы с более широким внутренним просветом.

Острие иглы характеризуется углом заточки  $\alpha$  (рисунок 1б) и формой. Угол заточки острия иглы может быть от 15 градусов до 45 градусов. Чем меньше угол заточки острия иглы, тем лучше ее пенетрационные способности. Для внутривенных, подкожных и внутримышечных инъекций используют иглы с углом заточки  $\alpha = 12^\circ \pm 2^\circ$  – исполнение с длинным срезом (без обозначения) и  $\alpha = 18^\circ \pm 2^\circ$  – исполнение с коротким срезом (обозначают буквой К).

Наиболее распространенными формами заточки острия иглы являются плоская, кинжальная и копьевидная (рисунок 2).

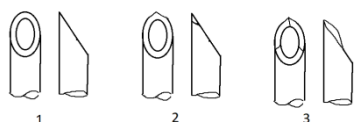


Рисунок 2 – Формы заточки острия игл: 1 – плоская; 2 – кинжальная; 3 – копьевидная

Проверку размеров игл на соответствие требованиям ГОСТ 25046-2005 в части прямолинейности для игл длиной свыше 50 мм проводят универсальными средствами измерений, обеспечивающими требуемую точность измерения. Радиусы притупления рабочей части иглы контролируют с помощью инструментального микроскопа на расстоянии 0,03 мм от конца иглы в сечении, перпендикулярном к оси инструмента.

Проверку упругих свойств трубки проводят одним из двух способов. В первом способе головку иглы прочно насаживают на наконечник измерительного устройства. Нулевую точку шкалы, расположенной перпендикулярно к оси трубки, совмещают с концом острия трубки. Конец трубки перемещают (рисунок 3) в направлении, перпендикулярном к оси трубки (изгиб) на расчетную величину  $a$ .

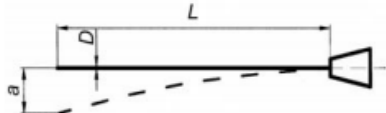


Рисунок 3 – Схема проверки упругих свойств трубки. Значение изгиба в мм определяют по формуле:

$$a = \frac{L^2}{350D}$$

где  $L$  – длина трубки, мм;  $D$  – наружный диаметр трубки, мм.

Испытание трубки на изгиб проводят в обе стороны от оси симметрии; по окончании испытания вершина острия иглы должна совпадать с нулевой точкой шкалы; допускаемое отклонение –  $\pm 0,7$  мм.

Данная проверка не распространяется на иглы длиной до 25 мм.

Во втором способе (рисунок 4) трубку иглы помещают на две опоры, к ее середине прикладывают нагрузку.

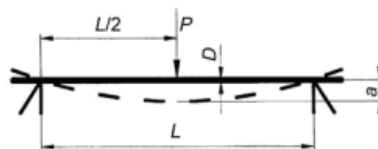


Рисунок 4 – Схема проверки упругих свойств трубки:  $L$  – расстояние между опорами, мм;  $P$  – нагрузка, Н;  $a$  – изгиб, мм

Разработанное устройство для испытания упругих свойств трубки инъекционной иглы состоит (рисунок 4) из основания 1, на котором смонтирована призма 2.

В ее пазу с помощью хомута 4 неподвижно установлен одноразовый шприц 3 с закрепленной на нем испытуемой иглой 5. На подставке 6,7, установленной на основании, расположена линейка 6 с ценой деления 1 мм, которая имеет возможность перемещаться по ее поверхности.

Свободный конец иглы располагается в пазу рычага 9, установленного в направляющем кронштейне 8, и совершает движение в направлении, перпендикулярном оси трубки, вызывая отклонение ее свободного конца.

Устройство работает следующим образом. Испытуемая игла закрепляется на шприце, последний устанавливается в пазу призмы и хомутом закрепляется на ней. Линейка устанавливается на подставке таким образом, чтобы свободный конец иглы совпадал с нулевым делением на ее шкале.

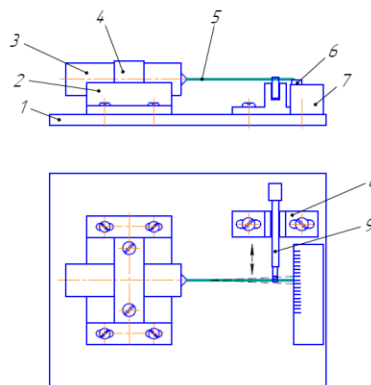


Рисунок 4 – Принципиальная схема устройства проверки упругих свойств трубки

Затем вилка рычага вводится в контакт с концом иглы и вручную перемещается на требуемое значение деформации при изгибе в обе стороны от оси симметрии иглы. После этого вилка рычага

га выводится из относительно первоначального, которое не должно превышать  $\pm 0,7$  мм.

Прочность трубки проверяют следующим образом (рисунок 5): трубку отделяют от головки и жестко закрепляют за один конец в приспособлении.

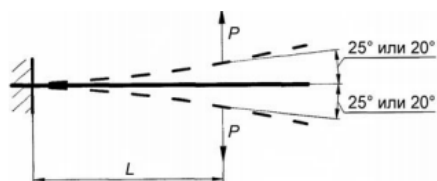


Рисунок 5 – Схема проверки прочности трубки:  $L$  – расстояние между жесткой опорой и точкой приложения изгибающего усилия;  $P$  – нагрузка,  $H$

На определенном расстоянии прикладывают к трубке усилие так, чтобы она согнулась на угол  $\pm 25^\circ$  или  $\pm 20^\circ$  соответственно для обычных и тонкостенных игл. После 20 полных циклов приложения усилия в противоположных направлениях проверяют иглу на наличие излома.

Принципиальная схема устройства проверки прочности трубки приведена на рисунке 6.

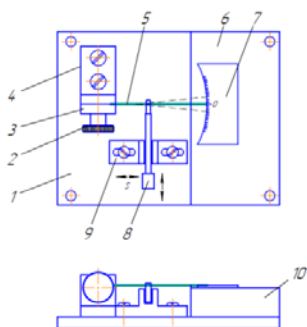


Рисунок 6 – Принципиальная схема устройства проверки прочности трубки

На основании 1 смонтирован узел крепления испытуемой трубки, предварительно отделенной от головки. Он представляет собой кронштейн 4, жестко связанный с основанием, к которому с помощью резьбового соединения прикреплена прижимная планка 3. Конец иглы 5, отсоединенный от головки, вставляется в паз между кронштейном и планкой и винтом неподвижно (консольно) закрепляется на кронштейне. На подставке 10, установленной на основании,

помещается транспортер 7, который имеет возможность перемещаться по ее поверхности.

На основании, с возможностью регулировочных перемещений вдоль оси иглы, установлен направляющий кронштейн 9. В его пазу от руки перемещается рычаг 8, имеющий на конце вилку, которая контактирует с испытуемой иглой.

Работает устройство следующим образом. Предварительно отделенный от головки конец трубки с помощью прижимной планки закрепляется на кронштейне таким образом, чтобы ее ось располагалась горизонтально.

Перемещая транспортер по поверхности подставки, добиться положения, при котором конец иглы будет совпадать с нулевой отметкой на транспортере. Пользуясь данными, приведенными в ГОСТ 25046-2005, определить расстояние  $L$  приложения нагрузки. Исходя из этого, установить направляющий кронштейн в необходимом положении и закрепить его. Ввести вилку на рычаге в контакт с иглой и вручную приложить к нему усилие перпендикулярно оси симметрии иглы, при котором трубка бы согнулась на  $\pm 25^\circ$  для обычной иглы и на  $\pm 20^\circ$  – для тонкостенной иглы. Указанные значения углов контролируются визуально по шкале транспортера. После 20 полных циклов нагружения иглы в противоположных направлениях, ее снимают с кронштейна и исследуют ее поверхность на наличие трещин.

### Литература

1. Товароведение: разложи все по полочкам [электронный ресурс]. : Медицинское товароведение – Иглы медицинские: классификация, характеристика (482 Мб) – Россия: znautovar.ru, 2015. – Режим доступа:
2. ГОСТ Р ИСО 7886-1-2009 Шприцы инъекционные однократного применения стерильные. Часть 1. Шприцы для ручного использования. – Введ. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 20.10.2009. – 13с.
3. ГОСТ 25046-81. Иглы инъекционные однократного применения. Основные размеры, технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2010-09-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 15с.

УДК 620.1.05

## УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ГОЛОВКИ С ТРУБКОЙ ИНЪЕКЦИОННОЙ ИГЛЫ

Киселев М.Г., Монич С.Г., Лобан Ю.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Иглы медицинские – это колющие инструменты, применяемые для выполнения различных диагностических и лечебных приемов: прививок, сшивания тканей при операциях, извлечения жидкостей, вливаний, иглотерапии.

Инъекционные иглы (рис. 1) – это колющий хирургический инструмент для выполнения лечебных и диагностических операций (вливаний и извлечения жидкости).

Иглы для инъекций, инфузий и трансфузий изготавливаются в виде трубки, один конец которой остро заточен для проникновения в ткани, а другой заканчивается головкой (канюлей). Головка имеет обязательно параллельные поверхности для удержания иглы пальцами (лыски). У инъекционных игл наиболее часты квадратные и круглые головки с лысками. Иглы для инфузий и трансфузий имеют более длинные головки оливобразной формы.

Заточка игл бывает копьевидной и кинжальной. Их длина находится в пределах 16–150 мм, а наружный диаметр – 0,4–2 мм.

По номеру иглы можно определить ее характеристики. К примеру, номер 0840 говорит о том, что ее диаметр равняется 0,8 мм, а длина составляет 40 мм [1].

Иглы Дюфо используют при переливании крови и вливании вязких жидкостей. При гемотрансфузии предпочтительны иглы с прямоугольной головкой и поперечными насечками для фиксации пальцами. Внутрикожные инъекции делают иглами с упором, предохранительная бусина некоторых типов изделий помогает контролировать глубину введения в ткани.

Вливание жидкостей или крови из флаконов предусматривает применение особых игл, имеющих большую длину и два отверстия, они позволяют выводить воздух взамен вытекающего из емкости раствора. С помощью специальной насадки такие иголки присоединяются к трубкам, а к шприцу типа Луер или наконечнику «Рекорд» – посредством переходных канюлей.

Виды трубчатых игл:

– нормальные инъекционные иглы (40 размеров);  
– специальные инъекционные иглы, отличающиеся от нормальных или рабочей частью, или головкой: игла для внутрикожных инъекций, игла для инъекций в полость околосердечной сумки (перикарда), игла для переливания крови («бабочка» Strausa, Дюфо), для взятия крови, игла с каплевидным утолщением на конце (для вскрытия вены при введении катетера), иглы к аппаратам;

– пункционно-биопсийные: игла для спинномозговых пункций (Бира), игла для стерильных пункций (Кассирского), игла для пункции и дренирования гайморовой полости, игла для пункционной биопсии паренхиматозных органов.

Пункционно-биопсийные (рис.1) иглы отличаются от инъекционных массивной головкой, а также наличием мандрена, имеющего свою головку. Мандрен плотно входит в канал иглы так, что его срез совпадает со срезом иглы, поэтому игла представляет как бы сплошной стержень, а не трубку. Они предназначены для вкалывания в ткани и полости с последующим введением или выводением жидкости, для взятия материала с целью гистологического исследования.

К пункционным иглам близки по конструкции и назначению троакары, которые представляют

собой колющий хирургический инструмент, применяющийся для прокола стенки полостей человека с целью выведения и введения жидкостей, введения эндоскопических инструментов, а также для забора материала на биопсию.

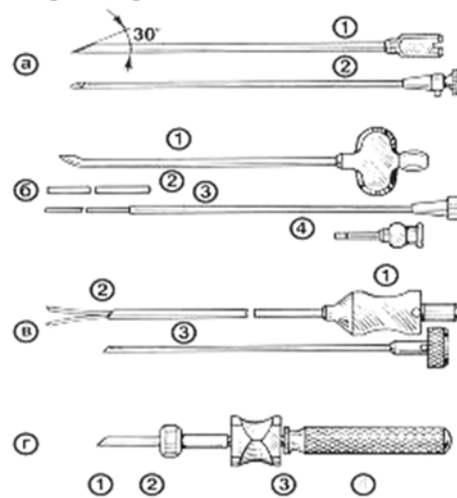


Рисунок 1 – Пункционно-биопсийные иглы: а – игла Бира для спинномозговой пункции с извлечением мандреном, выполняющим функции стилета (1 – игла, 2 – мандрен); б – игла для пункции и дренирования верхнечелюстной (гайморовой) пазухи (1 – игла, 2 – трубка из полиэтилена или фторопласта, 3 – проводник трубки, 4 – насадка); в – игла для пункционной биопсии паренхиматозных органов (1 – головка, 2 – биопсийная трубка, разрезанная на конце, 3 – мандрен); г – игла Кассирского для пункции костного мозга (1 – игла, 2 – гайка для регулировки глубины вкола, 3 – головка иглы, 4 – ручка, соединенная с мандреном)

Принципиальная схема устройства для испытания прочности соединения трубки с головкой иглы и фотография его общего вида приведены на рисунке 2.

На массивном основании 1 закреплены две вертикальные стойки 2, связанные между собой верхней поперечной планкой 3, что обеспечивает высокую жесткость конструкции. Механизм нагружения создан на опорной плите 4, которая прикреплена к вертикальным стойкам в верхней части П-образной конструкции. Он состоит из реверсивного электродвигателя 5 (РД-09), на валу которого закреплен винт 6, соединенный с гайкой 7, жестко связанной с направляющей 8. При работе электродвигателя последняя с малой скоростью (мм/мин) перемещается вдоль вертикальной оси, что обеспечивает практически статический режим нагружения испытуемого соединения. Для измерения усилия его разрушения используется электронный динамометр растяжения 9 (WeehengWN-A05) с ценой деления 0,1 Н. Одним концом он соединен с подвижной направляющей механизма нагружения, а вторым с концом трубки 10, головка которой жестко закреплена в приспособлении 11, прикрепленном к основанию устройства.

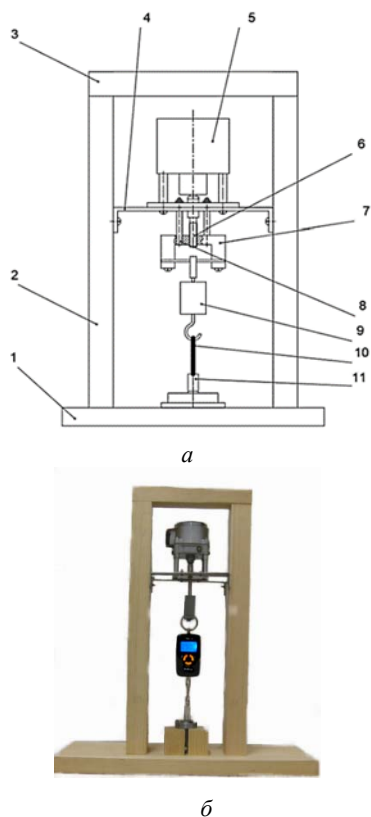


Рисунок 2 – Принципиальная схема устройства испытания прочности соединения трубки с головкой (а) и фотография его общего вида (б)

Работа на данном устройстве осуществляется следующим образом. Испытуемая игла устанавливается в зажимном приспособлении, конструкция которого представлена на рисунке 3.

Предварительно при снятой гайке 2 игла своим острием пропускается через отверстие в ней таким образом, чтобы головка иглы 7 располагалась во внутренней полости гайки. После этого она навинчивается на резьбовой конец цилиндрической опоры 1, неподвижно закрепленный на основании 8 устройства. Затем свободный конец иглы на расстоянии 5-8 мм с помощью винтов 4 зажимается между двумя стальными пластинами 3. В них предусмотрены симметрично расположенные сквозные отверстия 5, в которые входит зацеп динамометра. После выполнения этих действий, включается электродвигатель РД-09 и начинается

процесс нагружения испытуемой иглы с фиксированным по шкале динамометра приложенного усилия растяжения. В момент разрушения соединения трубки с головкой на игле динамометра фиксируется соответствующее усилие растяжения, которое должно быть не меньше значения приведенного в стандарте для данного размера и исполнения инъекционной иглы.

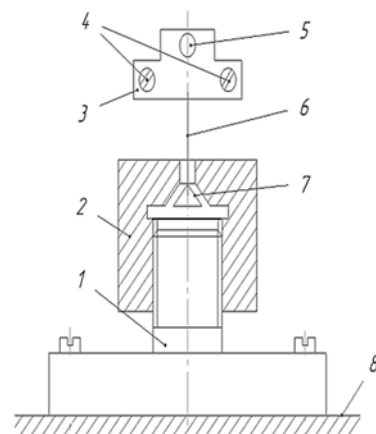


Рисунок 3 – Конструкция приспособления для закрепления испытуемой иглы

### Литература

1. ГОСТ 22967-90. Шприцы медицинские инъекционные многократного применения. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 1997-12-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 12 с.
2. ГОСТ 25046-81. Иглы инъекционные однократного применения. Основные размеры, технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2010-09-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 15 с.
3. ГОСТ 25725-89. Инструменты медицинские. Термины и определения. – Введ. 199-01-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 23 с.
4. ГОСТ 25377-82. Иглы инъекционные многократного применения. Технические условия. – Введ. 2011-09-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 10с.

УДК 620.3 : 621.3.049.77

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИСПЛЕЕВ

Муравьев А.В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Нанотехнологии являются междисциплинарной областью фундаментальной и прикладной науки и техники, которая имеет дело с совокупностью теоретического обоснования практиче-

ских методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомарной структурой путем контролируемого манипулирования отдель-

ными атомами и молекулами. Практический аспект нанотехнологии содержит производство устройств или их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами, а также применение таких устройств на практике. Использование в нанотехнологиях передовых научных достижений позволяет отнести их к «высоким технологиям». Сегодня нанотехнологии получили внедрение в такие области производства электроники как: микропроцессорная техника, носители информации и во многие другие сферы. Меньшие размеры микросхем и небольшая потребляемая мощность обуславливают более быструю обработку информации, а также большую вычислительную мощность.

В последние десятилетия значительные достижения в области физического материаловедения и физики твердого тела были связаны с созданием и использованием наносистем. По прогнозам, ряд многообещающих отраслей для применения наноматериалов включает в себя аэрокосмическую сферу, химическую и пищевую промышленность, транспортировку товаров. Нанотехнологии в первую очередь находят применение в системах записи информации, трансплантологии, при создании защитных покрытий высокой прочности и низкой степени окисления. К сожалению, современный уровень понимания основных физических явлений таких систем остается недостаточным для однозначных ответов и прикладного применения. Наносистемы являются представителями так называемых дисперсных структур, которые рассматриваются в материаловедении как гетерогенные системы, то есть состоят из нескольких фаз [1]. Такие системы приобретают все более широкое применение в ходе экспериментальных исследований в области гетерогенного катализа, синтеза нанопорошков и нанокompозитов, производстве нанокристаллов, тонких пленок и аэрозолей. В то же время наносистемы являются интересными объектами для фундаментальной науки, так как представляют собой пространственно ограниченные среды.

На сегодняшний день актуальной становится задача систематизации основных характеристик наноструктурных материалов и используемых нанотехнологий с целью рассмотрения перспектив их дальнейшего развития и применения в различных сферах промышленности, в том числе и при производстве дисплеев, приборов и устройств. Следовательно, целью работы является анализ, выявление основных проблем, а также наиболее перспективных с прикладной и научной точек зрения тенденций в нанотехнологиях, применяемых в конструкциях современных дисплеев.

Одним из самых известных направлений применения наноматериалов в последние годы явля-

ется использование серебряных нанопроводов для изготовления электропроводящего слоя сенсорных дисплеев, что позволяет значительно увеличить гибкость и прозрачность таких элементов, тем самым, увеличивая контрастность и сделав возможным создание закругленных дисплеев или даже таких, которые могут сворачиваться в рулон [2]. Такой проводник представляет собой нанопроволоку с практически бездефектной кристаллической решеткой, что обуславливает значительное увеличение прочности и практически полное отсутствие пластической деформации структуры. Эта технология стала основой так называемой «гибкой» электроники и в ближайшее время позволит в промышленных масштабах производить чрезвычайно прочные дисплеи различного назначения с высоким качеством изображения. В качестве альтернативной основы для получения монокристаллических нанопроводов используются частицы алюминия. Технология, истоков которой стоят ученые из института Макса Планка, в недалекой перспективе позволит минимизировать размеры микрочипов и существенно повысить качество микроэлектроники за счет применения кремниевых нанопроводов диаметром около 40 нанометров.

Не менее значительным стало открытие в 2004 году явления создания двух электронно-дырочных пар при поглощении фотона в ходе наблюдения за нанокристаллами селенида свинца, что в дальнейшем легло в основу технологии дисплея на квантовых точках [3]. Основными преимуществами таких устройств являются отсутствие подсветки, высокая контрастность, снижение энергопотребления и расширение спектра отображаемой палитры цветов. Однако данная технология так и не была реализована в полном объеме, ограничившись лишь модернизацией LCD (дисплеев на жидких кристаллах) без применения наночастиц проводниковых материалов.

Реальным коммерческим продуктом является технология OLED (дисплеи на органических и электролюминесцентных диодах), которая конструктивно напоминает квантовые дисплеи, состоящие из тонких органических пленок, расположенных между тонкопленочными проводниками [4]. Разработка основана на способности некоторых органических материалов излучать свет под действием электрического тока и получила широкое применение благодаря высокой технологичности производства, а, следовательно, более низкой стоимости по сравнению с технологией LCD.

В связи с прогрессом лазерных и светодиодных технологий [5] в последнее десятилетие получили качественный скачок в развитии HUD (Head-Up display) дисплеи - системы, позволяющие выводить информацию на прозрачные по-

верхности, которые находятся в фокусе поля зрения человека перед окружающими объектами, в виде дополнительного виртуального изображения. Впервые примененные в сфере военной авиации такие устройства с каждым днем получают все более широкое распространение в повседневной жизни благодаря основному их преимуществу – минимизации отвлекающих факторов. Классификация таких дисплеев происходит по типу используемого источника излучения, в качестве которого могут выступать ЭЛТ (электронно-лучевые трубки – технология, получившая начало в 1940 годах), современные светодиоды и лазеры [6]. Последние используются в устройствах, которые относятся к категории проекционных или голографических систем, и позволяют реализовать визуальный вывод информации непосредственно на сетчатку глаза с целью дополнения сведений об окружающей обстановке и улучшения восприятия информации.

Расширение номенклатуры искусственных углеродных наноматериалов и их аллотропных модификаций позволило качественно улучшить «твердотельную» микроэлектронику внедрением элементов, которые имеют высокую электропроводность и малую массу, таких как транзисторы, логические вентили и нанопровода. Применение углеродных нанотрубок в дисплеях с электронной эмиссией выведет их на принципиально новый уровень эволюции.

На данный момент наиболее важным является развитие и внедрение в производство технологий самоорганизующихся систем или искусственно организованных процессов, происходящих на атомно-молекулярном уровне, которые откроют доступ к синтезу новых наноструктур и получению объектов нанотехнологий в промышленных, а не единичных масштабах. Решающую роль при этом играет, прежде всего, наличие нужного инструментария, в том числе измерительного.

Дальнейшему развитию нанотехнологий способствует динамический анализ сфер и перспектив их применения, а также обеспечение современной метрологической и инструментальной

базами. Соблюдение этих условий создаст гарантии существования устойчивого рынка нанотехнологий.

Между тем оказывается, что уже более десятка лет человечество широко использует вполне реальные достижения нанотехнологий, присутствующие в сфере производства полупроводниковых приборов и микроэлектроники. Дальнейшая концентрация научных исследований в направлениях развития перспективных наноматериалов, таких как углеродные нанотрубки и серебряная нанопроволока, вскоре позволит вывести технологию промышленного создания дисплеев на уровень микроэлектроники и получить новые принципы формирования изображения.

### Литература

1. Шірінян А.С. Актуальні проблеми наноматеріалів і нанотехнологій / А.С. Шірінян, В.А. Макара // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, 2010. – № 2. – С. 223–269.
2. Афонский А.А. Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2011. – С. 58–61.
3. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Правда и вымысел / В. И. Балабанов, И.И. Балабанов. – М. : Эксмо, 2010. – С. 58–64.
4. Capelli R. et al. Organic light-emitting transistors with an efficiency that outperforms the equivalent light-emitting diodes // Nature Materials. – 2010. – № 9. – С. 496–503.
5. Морозов М.А. Современная лазерная дальнометрия / М.А. Морозов, А.В. Муравьев // Новые направления развития приборостроения: материалы 9-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 20–22 апреля. – Минск, Беларусь. – 2016. – 38 с.
6. Tyagur V.M. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat / V.M. Tyagur, O.K. Kucherenko and A.V. Murav'ev // Journal of Optical Technology. – vol. 81 (4). – 2014. – pp. 199–203.

УДК 621.822.71

### КИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ МЕЖДУ ДВУМЯ ДИСКАМИ И СОСТАВНЫМ КОЛЬЦОМ

Щетникович К.Г., Окопчук Я.В., Судникович К.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

При традиционном процессе полирования стеклянных шариков их размещают между двумя дисками, в каждом из которых нарезана кольцевая канавка радиусного профиля [1]. Один из дисков связан с приводом вращения и при силовом замыкании инструмента шарики под действием сил

сцепления перекатываются по кольцевой дорожке тороидальной формы. Большая длительность процесса полирования связана с низкой скоростью проскальзывания шариков относительно рабочих поверхностей дисков, так как обработка осуществляется в условиях трения качения. Повы-



свить производительность обработки можно, если шарики при перемещении по кольцевой дорожке будут скользить по ее поверхности, а мгновенная ось вращения будет быстро менять свое положение в пространстве.

Инструмент для полирования шариков 4 (рисунок 1) включает три элемента: нижний 1 и верхний 2 приводные диски и кольцо 3 составной конструкции. Кольцевая дорожка для размещения шариков образована коническими фасками приводных дисков и канавкой V-образного профиля на кольце.

Кольцо базируется на обрабатываемых шариках по двум внутренним коническим поверхностям и после силового замыкания дисков имеет только одну степень свободы – вращение вокруг вертикальной оси дисков. При включении привода шарики перемещаются по кольцевой дорожке контактируя одновременно с четырьмя поверхностями инструмента. Разные условия скорости дисков и различия давления по поверхностям контакта с инструментом вызывает скольжение шариков при перекачивании по кольцевой дорожке и переориентацию в пространстве.

Кинематику шариков рассмотрим при допущениях точечного контакта с инструментом и отсутствия скольжения в наиболее нагруженных точках. Учитывая вес кольца наиболее нагруженными участками на шарике (рисунок 2) будут поверхности контакта с дисками в окрестности точек  $A$  и  $B$ , а также поверхность контакта с кольцом в окрестности точки  $C$ .

Мгновенная ось вращения шарика пройдет через неподвижную точку  $C$  на конце и точку  $P$ , являющуюся полюсом скоростей  $\vec{V}_A$  и  $\vec{V}_B$  дисков.

Кольцо базируется на обрабатываемых шариках по двум внутренним коническим поверхностям и после силового замыкания дисков имеет только одну степень свободы – вращение вокруг вертикальной оси дисков. При включении привода шарики перемещаются по кольцевой дорожке контактируя одновременно с четырьмя поверхностями инструмента. Разные условия скорости дисков и различия давления по поверхностям контакта с инструментом вызывает скольжение шариков при перекачивании по кольцевой дорожке и переориентацию в пространстве.

Кинематику шариков рассмотрим при допущениях точечного контакта с инструментом и отсутствия скольжения в наиболее нагруженных точках. Учитывая вес кольца наиболее нагруженными участками на шарике (рисунок 2) будут поверхности контакта с дисками в окрестности точек  $A$  и  $B$ , а также поверхность контакта с кольцом в окрестности точки  $C$ .

Мгновенная ось вращения шарика пройдет через неподвижную точку  $C$  на конце и точку  $P$ , являющуюся полюсом скоростей  $\vec{V}_A$  и  $\vec{V}_B$  дисков.

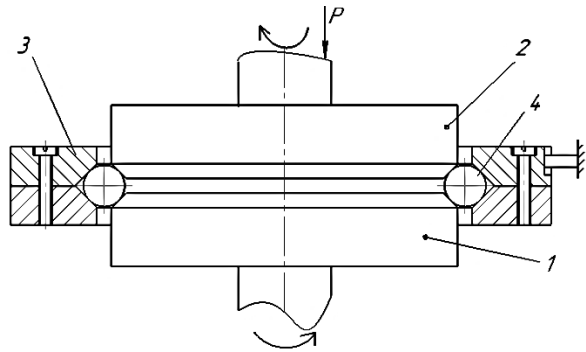


Рисунок 1 – Схема полирования шариков

Вектор  $\vec{\omega}$  абсолютной угловой скорости шарика разложим на составляющие вектора переносного движения  $\vec{\omega}_e$  и относительного  $\vec{\omega}_r$ , приходящего через центр шарика  $O$ .

При одинаковых углах конических фасок, равных  $45^\circ$ , углом  $\beta$  наклона вектора  $\vec{\omega}$  к горизонтالي составит

$$\operatorname{tg} \beta = 1 - \frac{\omega_H}{\omega_H + \omega_B},$$

где  $\omega_H$  и  $\omega_B$  – угловые скорости нижнего и верхнего дисков.

Рассмотренная кинематика является доминирующей при движении шарика по кольцевой дорожке. Расчёты показывают, что скорость скольжения шарика в несколько раз превышает величину скорости проскальзывания при обработке в кольцевых канавках радиусного профиля.

Погрешности формы контактирующих поверхностей и вибрации в технологической системе приводят к изменению мгновенного натяга в точках контакта шарика с инструментом.

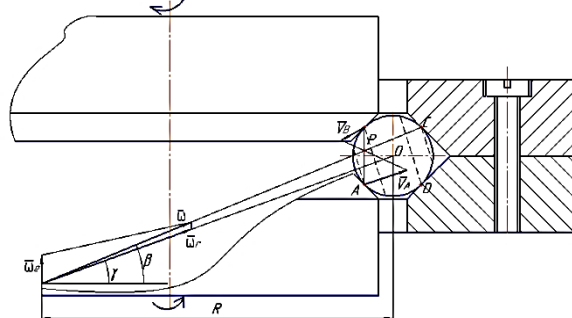


Рисунок 2 – Кинематика шара в зоне обработки

Значение абсолютной угловой скорости шарика находим по известной скорости шарика, например в точке  $A$  и расстоянию этой точки до линии действия вектора  $\vec{\omega}$ :

$$\omega = \frac{\sqrt{2} \cdot R - r}{2r},$$

где  $R$  – радиус кольцевой дорожки;  $r$  – радиус шарика.

Из геометрических построений можно определить величину положение составляющих векторов  $\vec{\omega}_r$  и  $\vec{\omega}_e$ .

$$\bar{\omega}_r = \omega \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\gamma}; \bar{\omega}_e = \omega \cdot \frac{\sin(\beta - \gamma)}{\cos\gamma},$$

где  $\gamma$  – угол наклона вектора  $\bar{\omega}_r$  к горизонтали.

След на поверхности шарика от контакта с инструментом представляет собой окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных вектору  $\bar{\omega}_r$ , (на рисунке 2 они показаны пунктирной линией).

Скорость скольжения шарика в точке D зависит от его угловой скорости и расстояния до мгновенной оси вращения

$$V_D = \sqrt{2} \cdot \bar{\omega}_r \cdot \cos\beta.$$

Например, если в данный момент давление инструмента на шарик минимально в точке C, то мгновенная ось вращения шарика пройдет через точки D и P. Это приводит к перемещению следов обработки по поверхности шарика, обес-

печивая равномерность обработки сферы. При интенсивном скольжении шарика происходит быстрое взаимная приработка контактирующей поверхностей. Площадь контакта шариков с инструментом увеличивается, способствуя повышению точности обработки и качества поверхности. В процессе шлифования кольцо самоустанавливается соосно приводным дискам в плоскости перпендикулярной их оси вращения и при этом не требуется каких-либо направляющих элементов, усложняющий конструкцию инструмента. Высокая точность расположения рабочих поверхностей инструмента позволяет достигнуть высокой точности полирования шарика.

#### Литература

Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов и др; под ред. М.А. Окатова – СПб. : Политехника, 2004. – 678 с.

УДК 621.892

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ И АНАЛИЗУ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ЗАКАЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Оцпа М.

*Зеленогурский университет, Зелена Гура, Польша*

Точение закаленных материалов принципиально отличается от процесса точения материалов в состоянии поставки, прежде всего из-за значительно более высокой твердости (выше 45 HRC). Используемые величины подачи  $f$ , как и глубины резания  $a_p$  подчиняются значительному ограничению с точки зрения более высоких, чем в случае традиционного точения, сил резания [1]. В отличие от точения «мягких» материалов, обработка материалов в закаленном состоянии характеризуется обычно отрицательным передним углом, изменяющим значения суммарных сил резания и вызывающим в поверхностном слое обрабатываемой детали более значительные сжимающие напряжения.

Точение закаленных материалов чаще всего производят без использования СОЖ, что ведёт к образованию очень высоких температур в зоне резания. В результате могут возникнуть тепловые повреждения обработанных поверхностей, например в виде микротрещин, а также образования в поверхностном слое так называемых «белых слоёв», отрицательно влияющих на эксплуатационные свойства. Белые слои являются зонами высокой твердости (выше 1000 HV), а также очень большой хрупкости [2, 3].

Режущие инструменты, используемые для точения закаленных материалов, с точки зрения особенностей процесса резания, должны характеризоваться прочностью, соответствующей очень большим механическим нагрузкам и высо-

кой температуре. Наибольшее практическое использование нашел поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN), который является вторым материалом после алмаза по твердости. Кубический нитрид бора имеет высокую химическую стабильность, согласно [4] даже при температурах, превышающих 1000°C, практически не растворяется в железе. PCBN имеет ударную вязкость и высокую прочность на термический шок. Дополнительно, его высокая твердость при повышенных температурах позволяет на реализацию процесса при высоких скоростях резания, чаще всего в диапазоне 90–300 м/мин [4, 5].

В работе [4] было исследовано влияние микроструктуры материала на износ режущего материала после точения сталей X155CrMoV12, 100Cr6, X38CrMoV5 и 35NiCrMo16, упрочненных до твердости 54 HRC. Результаты исследований зарегистрировали наибольший износ режущих инструментов при обработке сталей, имеющих в своей структуре значительное количество карбидов, вызывающих абразивное изнашивание материала инструмента.

В ряде исследований можно найти также другие выводы. В работе [6] было установлено, что адгезионный износ должен быть рассмотрен как преобладающий в каждом случае точения упрочненных сталей инструментами из PCBN.

Целью данных исследований был сравнительный анализ режущих инструментов из PCBN покрытых нитридом титана TiN при финишном

точении инструментальной стали AISI D2, закаленной до твердости  $\pm 62$  HRC при следующих режимах резания:  $V_c = 160$  м/мин,  $a_p = 0,2$  мм,  $f = 0,1; 0,2; 0,3$  мм/об.

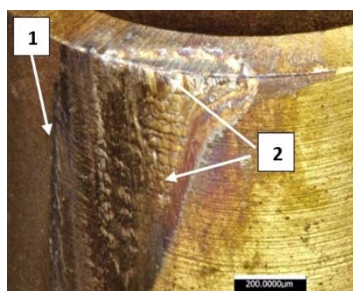


Рисунок 1 – Состояние реза после точения с подачей  $f = 0,1$  мм/об

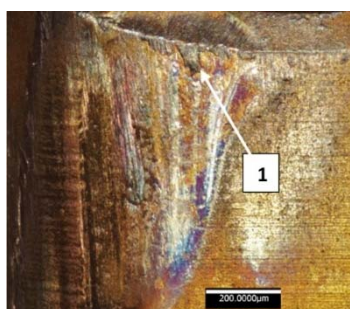


Рисунок 2 – Состояние реза после точения с подачей  $f = 0,2$  мм/об

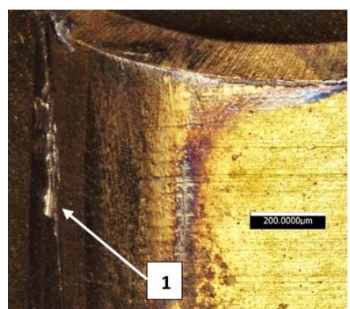


Рисунок 3 – Состояние реза после точения с подачей  $f = 0,3$  мм/об

Рис. 1 показывает состояние реза после точения с подачей  $f_1 = 0,1$  мм/об. Можно заметить налипы материала (1), а также следы истирания на задней поверхности реза (2).

Рис. 2 показывает состояние реза после точения с подачей  $f_2 = 0,2$  мм/об. Можно заметить значительное истирание задней поверхности (1), более значительное, чем для точения с подачей  $0,1$  мм/об.

Рис. 3 показывает состояние реза после точения с шагом  $f_3 = 0,3$  мм/об. Замечено значительное налипание материала на задней поверхности (1), однако истирание менее значительно по сравнению с точением с подачами  $f = 0,1$  и  $0,2$  мм/об.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что не описано однозначного механизма износа режущих инструментов из PCBN при точению материалов в упрочненном состоянии. Не только геометрия инструмента и параметры обработки, но и присутствие в CBN связующего вещества, химическая стабильность инструментального материала и состав обработанного материала могут иметь решающее влияние на износ реза. В связи с механизмами износа CBN при точении закаленных сталей, абразивное и адгезионное изнашивание могут быть приняты как главные причины износа данных инструментов. Интенсивность проявления конкретного механизма зависит, прежде всего, от структуры и химического состава обрабатываемого материала, механических и термических нагрузок в процессе обработки, а также от химического состава связующего вещества в поликристалле PCBN и его химической стабильности.

#### Литература

1. Pytlak B. *Optymalizacja wielokryterialna operacji toczenia stali 18HGT w stanie zahartowanym*. Bielsko-Biala: Akademia Techniczno-Humanistyczna, 2006. – 264 s.
2. Poulachon G., Bandyopadhyay B.P., Jadhavir I.S., Pheulpin S., Seguin E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Volume 43. – 2003. – pp. 139–144.
3. Sadik I.M. Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in Hard Part turning of different hardened steels. *5<sup>th</sup> CIRP Conference on High Performance Cutting*. Elsevier Procedia, 2012. – pp. 232–237.
4. Dawson T.G. *Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools*. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2002. – 188 p.
5. Siwiec J. *Obróbka materiałów w stanie utwardzonym*. Krakow : Politechnika Krakowska, nr 15, 2011. – pp. 93–100,
6. Rai G. The metallurgy of CBN and its wear in high speed machining of ferrous materials. *Proceeding of the International Conference on Machining of Advanced Materials*. Gaithersburg, 1993. – pp. 501–514.

УДК 535.421

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Полецук Н.Н., Рудницкий А.С.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [1] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном кварцевом цилиндре микронных размеров. Спецификой ФНС является достаточно высокая пространственная локализация светового поля в перпендикулярном падению излучения направлении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Интерес к этому эффекту обусловлен перспективами его практического применения в нанопотонике, биологии, медицине, наноэлектронике, системах хранения данных. Сообщается о возможности создания сенсоров высокого пространственного разрешения (нанометровый масштаб) [2], оптического скальпеля для прецизионной хирургии, оптического пинцета для манипулирования нанообъектами; возможна разработка устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации [3] и технологией безмасочного (прямого) нанесения наноплазмов на поверхность фотосенсоров [4]. Первые эксперименты по прямому наблюдению фотонных струй были проведены в СВЧ-диапазоне. При помещении в зоне ФНС металлической наночастицы наноструя вызывала огромное усиление обратного рассеяния этой частицы [6]. Для различных приложений требуются различные типы фотонных струй. Все это выдвигает на первый план проблему формирования ФНС с заданными параметрами для оптимальной реализации конкретных устройств. В работе [5] показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. В то же время для управления полным набором параметров ФНС и оптимизации их характеристик необходимы дополнительные свободные параметры. Одним из таких параметров является геометрическая форма частицы. В работе [7] приведены примеры численного моделирования фотонных струй от частиц в виде осесимметричного конуса, пирамиды, бруска с треугольным профилем.

В данной работе представлены результаты исследования влияния небольших изменений формы частицы на параметры ФНС.

Рассмотрим двумерную задачу дифракции плоской волны

$$\vec{E}_0 = [0, u_0, 0], \quad \vec{H}_0 = [u_0 \sin \theta, 0, u_0 \cos \theta], \quad (1)$$

$$u_0(x, z) = \exp[-ik(x \cos \theta + z \sin \theta)]$$

на диэлектрическом цилиндре. Исходное интегральное уравнение представим в виде:

$$u(r) = u_0(r) + \int_S u(r') K(r, r') dr', \quad (2)$$

$$K(r, r') = -0,25k^2(\varepsilon - 1)iH_0^{(2)}(k|r - r'|).$$

Приближенное решение ищем в виде линейной комбинации базисных функций

$$u(r') = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r') \quad (3)$$

В качестве базисных функций выбирается система характеристических функций Хаара. Чтобы ввести их, разобьем область поперечного сечения  $S$  на  $N$  непересекающихся множеств  $S_n$ . Тогда базисная функция полагается равной единице 1, если переменная интегрирования принадлежит области  $S_n$ , и равной нулю, если не принадлежит. Система уравнений для определения коэффициентов  $c_n$  принимает в этом случае вид:

$$\sum_{n=1}^N c_n A_{mn} = u_{0m}, \quad (4)$$

$$A_{mn} = \delta_{mn} + \int_S K(r, r') dr'.$$

При вычислениях полагали, что падающая волна распространяется вдоль диагонали квадратного сечения ( $\theta = \pi/4$ ). Диэлектрическая проницаемость материала цилиндра равна 2, а для окружающей среды 1. Размеры сечения в длинах волн равны:

$$1 \leq x \leq 2, 1 \leq z \leq 2.$$

На рисунке 1 показано распределение интенсивности дифракционного волнового поля в области

$$1 \leq x \leq 3, 1 \leq z \leq 3.$$

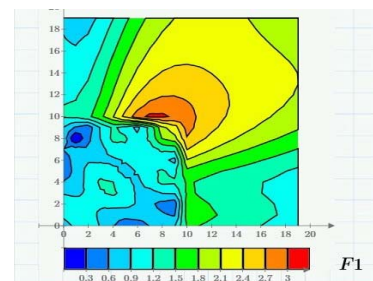


Рисунок 1 – Распределение интенсивности волнового поля для частицы квадратной формы

Она включает сечение цилиндра и ближнюю зону на расстоянии длины волны от его поверхности. Видно, что при заданном угле падения,

который раньше не рассматривался в литературе, область повышенной интенсивности волнового поля формируется вблизи вершины угла с внешней стороны поверхности. Максимальное превышение интенсивности падающей волны равно примерно четырем.

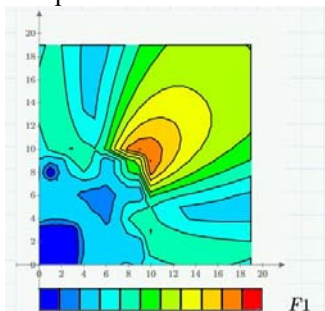


Рисунок 2 – Распределение интенсивности волнового поля для частицы сложной формы

Второй рисунок относится к измененной форме поперечного сечения. Для этого в области  $1 \leq x \leq 1.3; 1 \leq z \leq 1.3$

диэлектрическая проницаемость полагается равной единице. Эта область относится уже к свободному пространству. Наблюдается в этом случае уменьшение поперечного размера ФНС.

Для сравнения продольных размеров требуются дополнительные расчеты в расширенной ближней зоне.

Таким образом, при отклонении формы диэлектрической изолированной частицы от заданной (в рассмотренном случае правильной) возможно улучшение параметров ФНС. Дополнительным фактором оптимизации структуры ФНС

является направление распространения падающей волны.

### Литература

1. Chen Z., Taflove A., Backman V. Potonic-nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles // *Optics Express*. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.
2. Chen Z., Taflove A., Backman V. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets// *Optics Express*. – 2005. – № 13(2) – P. 526–533.
3. Kong S.-C., Sahakian A., Heifetz A., Taflove A., Backman V. Robust detection of deeply sub-wavelength pits in simulated optical data-storage disks using potonic jets // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 211102.
4. Соффер В.А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии // *Вестн. РАН.* – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 11 – 22.
5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К. Эффект фотонных наноструй в многослойных микронных сферических частицах // *Квантовая электроника.* – 2011. – Т. 41, № 6. – С. 520–525.
6. Heifetz A., Huang K., Sahakian A., Li X., Taflove A., Backman V. Experiment confirmation of backscattering enhancement induced by a potonic jets // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 221118.
7. Минин И.В., Минин О.В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // *Вестн. Новосибир. гос. ун-та* – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.

УДК 536.46

## ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>1</sup>, Попов Р.Ю.<sup>2</sup>, Мухлядо В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Особый интерес для практического использования применительно к алюмосиликатным огнеупорам представляют новые покрытия, полученные по СВ-технологии (самораспространяющегося высокотемпературного синтеза), получившие название защитно-упрочняющих оксидно-керамических (ОКП). ОКП предназначены для нанесения их на поверхность алюмосиликатных изделий и теплоизоляционных материалов, используемых в футеровках металлургических печей и котельных установок, печей по производству строительных материалов и др. Оксидно-керамические покрытия, нанесенные на поверхность огнеупоров, расширяют область температурного применения огнеупорной основы, при-

водят к значительному уменьшению физико-химической и механической эрозии ее поверхности, заметно (на 50–100 °С) повышают температурные ресурсы огнеупоров в условиях статических и динамических (в том числе циклических) воздействий агрессивных сред и высокотемпературных газовых и пылевых потоков.

ОКП образуются на поверхности шамотных огнеупоров, в том числе легковесных и ультра-легковесных, в процессе инициирования реакции СВС в обычном режиме эксплуатации тепловых агрегатов при 700–850 °С. Толщина огнеупорного покрытия может быть различной (1–4 мм) в зависимости от производственной необходимости. Сочетание специально подобранных компо-

ментов с широким набором, физико-химических и механических характеристик позволяет получать покрытия с разнообразными эксплуатационными свойствами. ОКП отличаются высокими огнеупорностью (до 2000 °С), механической прочностью, износостойкостью, а также кислотно-щелочной стойкостью в среде агрессивных продуктов горения и отходящих дымовых газов. Покрытия существенно улучшают поверхностные характеристики огнеупорного материала – основы: уменьшают ее пористость в 1,5–2,0 раза (в зависимости от начальной кажущейся плотности материала). Изменение всего комплекса свойств огнеупоров за счет нанесения ОКП приводит к значительному увеличению срока эксплуатации футеровок тепловых агрегатов.

Известные футеровочные смеси komponуются, как правило, из соображений схожести химического состава смеси и базового огнеупора. Это способствует совместимости и адгезионному сцеплению наносимого футеровочного материала и базового на который он наносится. Однако, даже при такой химической совместимости, могут возникнуть проблемы с обеспечением адгезионного сцепления футеровочной или ремонтной смеси с основой, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежное адгезионное сцепление в течение продолжительного периода эксплуатации в условиях высокотемпературных воздействий статического или динамического (в том числе циклического) характера. Часто, под воздействием указанных факторов происходит отслоение футеровки, ее выкрашивание или образование раковин и прогаров, что сокращает ресурс эксплуатации высокотемпературного теплового агрегата. Для предотвращения подобных явлений необходимо осуществлять рациональный подбор исходных компонентов и согласование покрытий по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР).

В настоящей работе для приготовления масс использовались следующие сырьевые материалы: алюминиевая пудра марки ПАП-1 или ПАП-2 (ГОСТ 5494-95), оксид кремния в виде кварцевого песка Гомельского ГОКа марки С-070-2 (ГОСТ 22551-77), оксид железа (III), каолин месторождения «Дедовка» природный, глина «Лукомль» и натрий кремнефтористый (ГОСТ 87-77), электрокорунд (ГОСТ 28818-90), волластонит, отход глазурей ОАО «Керамин», жидкое стекло.

Исходные компоненты измельчались, смешивались в сухом состоянии, затем в состав массы вводилось жидкое стекло и вода до получения пастообразной консистенции.

При нанесении состава в производственных условиях на рабочие поверхности футеровочной кладки любого действующего теплоагрегата создание защитно-упрочняющего слоя осуществляется с помощью пневмоинструментов или пульверизаторов. Нанесенный таким образом

защитный слой футеровки теплоагрегата подвергается естественной сушке в течение суток до полного его отверждения.

При выведении агрегата на рабочий режим и достижении температуры разогрева порядка 500–850 °С в материале покрытия и/или в швах кладки инициируется СВС, который распространяется в виде волны направленного горения по слою нанесенной огнеупорной смеси. При этом в реакционной зоне волны горения при температурах 1400–1800 °С происходит синтез новых оксидно-керамических структур муллитового типа  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , а также более сложных огнеупорных соединений.

Фазовый состав покрытий характеризуется наличием различных огнеупорных кристаллических фаз в материале покрытий: корунд,  $\alpha$ -кварц, кремния, периклаз, муллит и др.

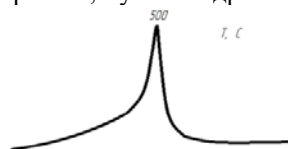


Рисунок 1 – Температура начала воспламенения защитного покрытия

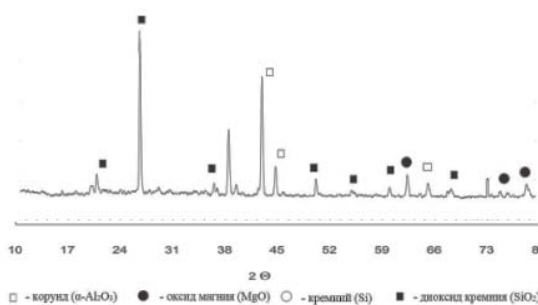


Рисунок 2 – Фазовый состав покрытия

Благодаря нанесению защитных покрытий на рабочие поверхности футеровочной кладки из алюмосиликатных материалов ресурс работы теплоагрегата увеличивается в несколько раз. В процессе исследований отмечалось, что наибольшая механическая прочность достигается в составах, в которых содержится отход глазурей ОАО «Керамин», это объясняется тем, что в процессе синтеза, наряду с активным формированием стекловидной фазы (основу которой составляют оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), присутствуют огнеупорные компоненты, такие как:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , способствующие повышению указанной характеристики за счет особенностей своего строения, а также специфических свойств.

Отмечается, что введение его способствует не только спеканию покрытия, но и насыщению материала  $\text{ZrO}_2$ , который может обеспечивать кристаллизацию полезных для прочностных свойств фаз, например, муллита. Важной составляющей массы является кремнефтористый натрий – являющийся активным компонентом смеси, обеспечивающий интенсивное формирова-

ние стекловидной фазы совместно с другими компонентами шихты (например, оксидом железа).

На некоторых участках покрытий фиксируются четкие формы кристаллической составляющей, что, по нашему мнению, может быть идентифицировано как тридимит – полиморфной разновидности кварца с достаточным характерным габитусом кристалла. Наличие такой составляющей положительно влияет на термомеханические характеристики покрытий – улучшается механическая прочность, огнеупорность и температура начала деформации под нагрузкой. Размер кристаллов составляет 25–40 мкм.

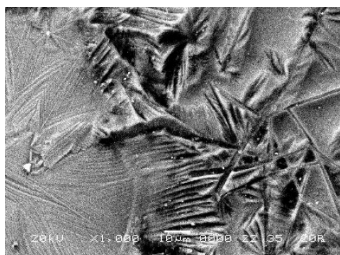


Рисунок 3 – Результаты электронной микроскопии оптимального образца, обожженного при температуре 1150 °С

Образцы оптимального состава, полученные по указанной технологии и обожженные при

температуре 1150 °С, характеризовались следующим набором свойств: водопоглощение – 16,0 %; открытая пористость – 21,0 %; кажущаяся плотность – 1348 кг/м<sup>3</sup>; твердость по шкале Мооса 8, теплопроводность (Т = 200 °С) находится в интервале 0,400–0,548 Вт/м·К. Анализ данных рентгенофазового исследования большинства образцов составов свидетельствует о том, что основными кристаллическими фазами покрытий являются α-кварц (или его разновидности), корунд, гематит, а также целый ряд твердых растворов криптористаллической структуры (алюмосиликаты кальция и натрия) по своему химическому составу близкому к плагиоклазу.

#### Литература

1. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов. – Москва: Химия, 1983. – 144 с.
2. Петюшик, Е.Е. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / Е.Е. Петюшин, В.Е. Романенков, С.М. Ушеренко. – Минск : МИПК при БГПА, 2000. – 66 с.

УДК 621

### МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ С ИМИТАТОРОМ КОСТНОЙ ТКАНИ

Потапенко Е.А., Монич С.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время для испытания образцов имплантатов используется методика по определению усилия сдвига на испытательной машине согласно ГОСТ Р 52641-2006. При этом для соединения исследуемых поверхностей между собой используется костный цемент либо эпоксидный клей [1].

Согласно этой методике определяется только касательное напряжение (напряжение сдвига), а напряжение на отрыв не измеряется, что снижает информативность проводимых испытаний [1].

Для получения экспериментальных данных, отражающих влияние именно состояния поверхности образца на прочность ее соединения с имитатором костной ткани с использованием фиксирующего материала необходимо, чтобы прочность соединения последнего с поверхностью имитатора костной ткани была выше, чем прочность соединения фиксирующего материала с испытуемой поверхностью образца [2–4]. С учетом этого, в качестве материала костной ткани предложено использовать пемзу. Необходимая в процессе проведения испытаний прочность самой пемзы на сдвиг и на растяжение при

отрыве обеспечивается конструкцией созданного имитатора костной ткани (рисунок 1).

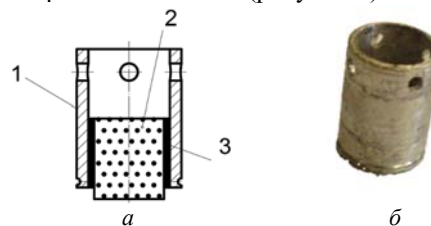


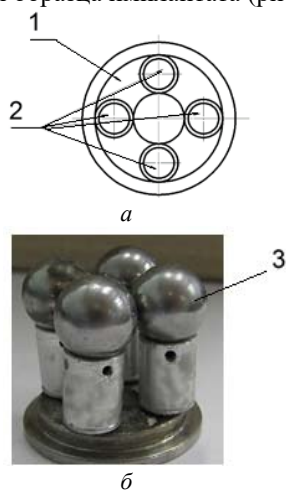
Рисунок 1 – Конструктивное исполнение (а) и фотография (б) имитатора костной ткани

Он состоит из стальной цилиндрической трубки (оправки) 1, внутри которой с гарантированным зазором установлен цилиндр 2 из пемзы диаметром 7 мм с размером пор 0,12 мм. С помощью эпоксидной смолы 3 он приклеивается к внутренней поверхности оправки с таким расчетом, чтобы торец пемзы выступал из трубки на 2–2,5 мм.

Этот припуск необходим для окончательной обработки торцевой поверхности пемзы, в результате которой этот размер уменьшается до 1–1,5 мм.

После подготовки образцов осуществляется процедура формирования соединения их поверхностей с использованием того или иного фиксирующего материала. Причем на модифицированной поверхности каждого образца имплантата одновременно получается четыре симметрично расположенных соединения (рисунок 2а), что повышает информативность и достоверность предложенной методики оценки их прочностных характеристик.

Данная процедура включала в себя последовательное выполнение следующих действий. На горизонтально расположенную поверхность пемзы равномерным слоем наносился фиксирующий материал. Затем она в соответствующем месте устанавливалась на предварительно обезжиренную и горизонтально расположенную поверхность образца имплантата. После фиксации на ней всех четырех образцов пемзы, последние с помощью стальных шариков диаметром 12 мм, установленных в цилиндрические отверстия оправок имитаторов костной ткани, с постоянным усилием (0,56 Н) прижимались к поверхности образца имплантата (рисунок 2б).



1 – образец титанового имплантата; 2 – образцы имитатора костной ткани; 3 – стальные шарики, установленные в отверстия оправок.

Рисунок 2 – Схема расположения соединений, получаемых на металлической поверхности образца имплантата (а) и фотография общего вида собранной конструкции (б)

Излишки связующего материала, вытесненные из зоны соединения, аккуратно удалялись вручную. По истечении времени, необходимого для затвердевания связующего материала, прижимные грузы (шарики) снимались, после чего полученные соединения подвергались испытаниям на сдвиг и на разрыв.

Для их проведения была создана специальная установка, позволяющая проводить испытания полученных соединений как на сдвиг, так и на отрыв.

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 3.

Она состоит из электродвигателя 1, передающего крутящий момент через муфту 8 и червячный редуктор 9 на передачу «винт-гайка» 5. Причем в конструкции предусмотрена два винта, один из которых нагружает испытуемый образец 7, а второй предназначен для измерения разрывного усилия, для чего в конструкции используется энкодер 2. Измерительное усилие снимается с тензодатчика силы 6, который связан с одной стороны с образцом, а с другой стороны – с механизмом нагружения.

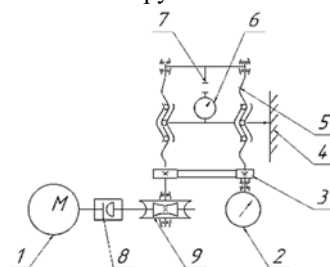


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки для проведения испытаний на отрыв и на сдвиг соединения образцов титановых имплантатов с имитатором костной ткани

В процессе перемещения подвижной направляющей вверх (рабочий ход), происходит плавное нагружение испытуемого соединения вплоть до его разрушения, а соответствующее этому моменту значение нагрузки фиксируется по показаниям динамометра. После этого, изменяется направление вращения вала электродвигателя на противоположное и направляющая механизма нагружения перемещается вниз (холостой ход) до своего начального положения. Затем испытуемый образец переустанавливается на основании установки таким образом, чтобы провести испытания следующего из четырех сформированных на его поверхности соединений. За окончательное значение прочности исследуемого соединения (на сдвиг или отрыв) принимается среднее арифметическое четырех значений разрушающей нагрузки, полученных при испытаниях одного образца металлического имплантата, т. е. при неизменных параметрах шероховатости его поверхности.

Из сравнительного анализа полученных экспериментальных данных следует, что соединение образца костной ткани с образцом металлического образца посредством стоматологического цемента «Уницем» обеспечивает его наибольшую прочность (величина усилия на сдвиг составляет 15,3 Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ , а величина усилия на отрыв – 13,3 Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ ), менее прочное соединение обеспечивает гипс (величина усилия на сдвиг составляет 13,1 Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ , а величина усилия на отрыв – 10,3 Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ ) и наименьшее – плазма крови человека (величина усилия на сдвиг составляет 3, Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ , а величина усилия на отрыв – 2,8 Н при  $R_a = 5,7 \text{ мкм}$ ).



### Литература

1. ГОСТ Р 52641-2006. Имплантаты для хирургии. Стандартный метод испытаний для проверки на сдвиг фосфатно-кальциевых и металлических покрытий. – М. : «СтандартИнформ», 2007. – 15 с.

2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Влияние электроконтактной обработки с ультразвуком на параметры поверхностей титановых имплантов. Материалы VI международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». – Мн. : 2011. – С. 129–136.

3. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов. Сборник докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Мн. : 2011. – С. 53–57.

4. Савич В.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич, Д.И. Сарака, М.Г. Киселев, М.Г. Макаренко; под научн. ред. В.В. Савича. – Мн. : «Бел. навука», 2012. – 244 с.

УДК 621.762

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Металлургические аддитивные технологии (далее – АТ) создали уникальные возможности для рационального конструирования из титановых, жаростойких и алюминиевых сплавов, легированных сталей, полиметаллов деталей машин и приборов сложной формы, содержащих замкнутые внутренние полости, облегчающих конструкцию без ущерба ее прочности, каналы охлаждения или коммуникаций гидро- и пневмосистем [1]. До недавнего времени считалось, что область АТ – индивидуальное и мелкосерийное производство, что связано с известными недостатками АТ: высокие требования к узкому грансоставу исходных порошков и к их сферичности [2]; для тонкостенных изделий необходимо выстраивать поддержки, которые затем надо удалять; необходимо в любом случае отделять построенную деталь от технологического поддона; габариты изделий ограничены размерами рабочей зоны используемой установки (на сегодняшний день для подавляющего большинства не более 500-800 мм), поскольку построение ведется в атмосфере аргона либо вакуума; для приемлемой механической прочности, в первую очередь – усталостной, полученные АТ детали необходимо подвергать дополнительной обработке температурой и давлением – ГИП (горячему изостатическому прессованию); низкая скорость построения (как правило, часы, десятки и даже сотни часов для относительно крупных деталей). В то же время недавно отпразднованный дочерним предприятием корпорации General Electric – компанией GE Additive company 10-летний юбилей производства ацетабулярного компонента Delta-TT Cup (рис. 1) тотального эндопротеза тазобедренного сустава [3] в суммарном количестве 100 000 штук приводит к мысли о том, что правильная организация даже

при не очень новом оборудовании АТ позволяет успешно решать масштабные задачи.



Рисунок 1 – Ацетабулярный компонент Delta-TT Cup

Целью данной работы является анализ тенденций в совершенствовании материалов и методов АТ, направленных на повышение производительности и снижение себестоимости – главных задач любого производства.

Компания Matsuura Machinery предлагает гибридную технологию – сочетание SLM-технологии и механообработки [4]. В рабочей камере машины LUMEX Avance-25 ведется послойное построение детали, как и в других АТ машинах. Через каждые 10 слоев производится чистовое фрезерование выращенной части детали (шпиндель 43000 мин<sup>-1</sup>). Другой тип АТ – прямого наплавления порошка в сочетании с механической обработкой в одном цикле реализует на машине MU-8000V Laser EX компания Okuma [5]. Обе комбинированные технологии позволяют решить две проблемы АТ: повышение производительности с учетом постобработки и повышение размерной точности посадочных поверхностей. Кроме того, расширяются и технологические возможности.

Перспективным методом повышения производительности АТ становится технология Binder Jet Metal Additive Manufacturing [6]. Чем-то эта технология напоминает МИМ: и там, и там полимерное связующее удерживает частицы металла в формовке и удаляется перед или в процессе спе-

кания. Однако скорость формирования порошковой смеси с жидкой связкой достигает  $100 \text{ см}^3/\text{ч}$  (методами SLS и SLM – всего до  $15\text{-}20 \text{ см}^3/\text{ч}$ ), шероховатость поверхности формовки в этом случае –  $Ra 6 \mu\text{m}$  без финишной обработки.

Повысить производительность процесса АТ можно и традиционно: оптимизацией и уплотнением размещения формовок на платформе построения [7]. Представленный на рис. 2 пример показывает, что за счет рационального и трехмерного расположения формуемых деталей можно достичь заполнения 82 % объема камеры построения.

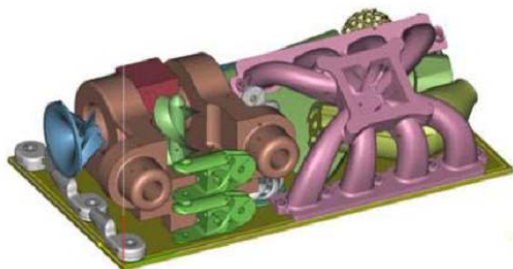


Рисунок 2 – Рациональное заполнение камеры построения

Еще один традиционный путь создания промышленного АТ производства – линейаризация: работа одновременно на большом количестве машин – 20, 30, 50 – что стало уже нормой у лидеров отрасли по всему миру.

Накопление экспериментальных результатов и смелые идеи при их реализации разрушают стереотипы АТ. Так авторы работы [8] успешно показали не только принципиальную возможность построения 3D объектов из тугоплавкого порошка вольфрама при мощности лазера 300 Вт и даже 250 Вт, но и необязательность выделения узкой фракции и сферических частиц (рис. 3). Да, в этом случае остаются отдельные изолированные поры, но их можно ликвидировать дополнительной обработкой ГИП. Однако стоимость такого полидисперсного и несферического порошка вольфрама несравнимо меньше, чем сферического.

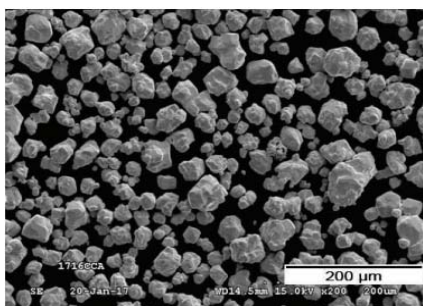


Рисунок 3 – Морфология частиц порошка вольфрама марки AM W300, использованного в АТ [8]

Еще дальше пошли авторы работы [9], которые сознательно использовали в АТ известный в порошковой металлургии прием, когда в исходную шихту из крупных частиц порошка вводят определенное количество мелких частиц того же

химического состава. Мелкие частицы заполняют поры между крупными, повышают плотность укладки (рис. 4) и, тем самым, плотность и прочность готового изделия.

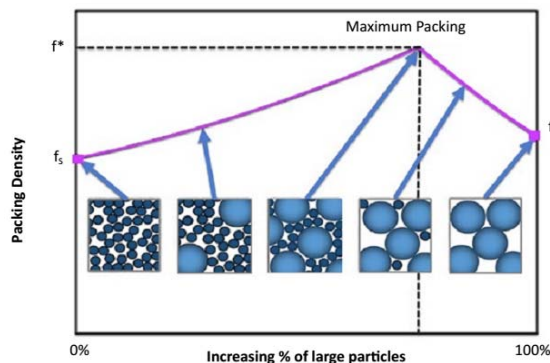


Рисунок 4 – Плотность упаковки бидисперсных частиц [9]

Перспективным методом повышения производительности АТ является использование в одной машине двух лазеров для построения. Так новый комплекс Concept Laser X line 2000R имеет не только одну из самых больших областей печати ( $800 \times 400 \times 500 \text{ мм}$ ), но и параллельно работает двумя лазерами мощностью по 1 кВт [10], что в 2 раза повысило скорость построения.

В заключении следует отметить некоторые тенденции в развитии металлургических АТ, приближающих их к промышленным как с точки зрения повышения производительности, так и снижения себестоимости:

- сочетание в одной машине технологии SLS, SLM или DMD с механической высокоскоростной и прецизионной многошпиндельной обработкой.
- оснащение машины двумя лазерами, работающими параллельно;
- все более широкое применение технология Binder Jet Metal Additive Manufacturing;
- использование более дешевых несферических и полидисперсных смесей порошков, в том числе и после рециклинга, при отработке соответствующих режимов АТ.

Традиционные пути – рациональное моделирование наиболее плотного заполнения камеры построения различными деталями из одного порошка, а также создание производств с десятками однотипных машин, работающих параллельно, дает ощутимый эффект в промышленном АТ-производстве.

### Литература

- 1 Савич В.В. Уникальные возможности металлургических аддитивных технологий при конструировании деталей машин и приборов // Материалы докладов 10-й международной научно-технической конференции «Приборостроение–2017». – Минск : БНТУ, 2017. – С. 232–236.
- 2 Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / Ильющенко А.Ф.,

Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редколл.: А.И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, ГрГУ, 2016. – 274 с. – С. 20–30.

3 Celebrating ten years of metal AM hip cups as GE launches validation consultancy for medical devices // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4 No. 1. – P. 11.

4 Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Avance-25 & Applications/ [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file\\_attachments/1300\\_matsuura.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf)

5 Okuma Introduces New Hybrid 3D Printer and CNC Machine // <https://3dprint.com/220638/okuma-hybrid-3d-printer-cnc/>

6 Emily-Jo Hopson. Digital Metal: High-precision Additive Manufacturing technology from a

metal powder giant / Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 103–111.

7 David Whittaker. Alternative metal Additive Manufacturing technologies highlighted at Euro PM2017 // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 131–140.

8 Direct metal laser sintering/selective laser melting of tungsten powders / Ravi K. Enneti, Rick Morgan, Thomas Wolfe and all // Volume 53, No. 4, 2017 International Journal of Powder Metallurgy. – P. 23–31.

9 Debbie Huck-Jones. Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance // Metal Additive Manufacturing | Winter 2017. Vol. 3. No. 4. – P. 99–103.

10. GE Additive Machines: Direct Metal Laser Melting (DMLM) machines // <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r>.

УДК 538.2; 620.179.14

## РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЧАСТНЫХ ПЕТЛЯХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одна из областей применения приборов магнитной структуроскопии – контроль структурно-го состояния и прочностных характеристик термически обработанных стальных изделий. Физической основой такого контроля является высокая чувствительность магнитных свойств сталей к изменениям их структуры. В большинстве случаев используют характеристики предельной петли магнитного гистерезиса материала изделия: коэрцитивную силу  $H_{cs}$ , остаточную намагниченность  $M_{rs}$ , намагниченность  $M_s$  технического насыщения [1]. Их измерение стандартными методами не производитительно. Это обуславливают применение бесконтактного намагничивания изделий в разомкнутой магнитной цепи и получения информации об их остаточной намагниченности  $M_d$  при движении изделий [2].

Но изделия имеют размагничивающий фактор  $N$  [3] и в разомкнутой магнитной цепи их материал намагничивается по частным петлям магнитного гистерезиса. Методика расчета  $M_d$  стальных изделий, намагниченных на частных петлях магнитного гистерезиса, разработана в [4, 5]. Но в результате многочисленных исследований, обобщенных в [6, 7], использованные в [4] формулы уточнены.

Цель доклада – корректировка методики расчета остаточной намагниченности  $M_d$  изделия при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи и ее использование для анализа зависимости  $M_d$  стальных изделий от режима их термической обработки.

При расчете использованы следующие экспериментально обоснованные формулы.

Для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H_m}{H_m^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[ \sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (1)$$

Для нисходящей ветви ветвей петли гистерезиса:

$$M = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[ 2 \arctg \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \sum_{n=0}^1 \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (2)$$

где  $M$  – намагниченность материала в поле  $H$  на ветвях петли гистерезиса после намагничивания в поле  $H_m$  до намагниченности  $M_m$ ,

$$K_{II} = M_{rs} / M_s, T = \operatorname{tg}(\pi K_{II} / 2), \tau = 1 \text{ м/кА},$$

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{T}, k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg(2H_{cs}/H_0)}{M_C - \chi_a H_{cs}/2} - 1,$$

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}}{(2,9 + 35e^{-1,75\pi H_{cs}}) H_{cs}} - 1,$$

$$M_C \approx 0,67 [0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}.$$

На первом этапе расчета, решая совместно уравнение (1) и уравнение  $H_m = H_e - NM_m$ , находили  $M_m$  и  $H_m$  в изделии при намагничивании во внешнем поле  $H_e$ .

На втором этапе расчета, полагая в (2)  $M=M_d$  и решая совместно уравнение (2) и уравнение  $H=-NM_d$ , находили  $M_d$  изделия после намагничивания во внешнем поле  $H_c$ .

В качестве примера реализации разработанной методики на рисунке приведены рассчитанные по ней зависимости  $M_d$  шпилек диаметром 10 мм, длиной 100 мм ( $N \approx 0,015$  [3]) из стали 40X от температуры  $T_0$  их отпуска после закалки. При расчете использованы результаты [8] измерения  $H_{cs}$ ,  $M_{rs}$  и  $M_s$  стали 40X после отпуска при разных температурах  $T_0$ , приведенные в таблице.

Таблица – Магнитные свойства стали 40X, отпущенной при разных температурах  $T_0$  после закалки от 860°C по данным [8, табл.26.2]

| $T_0$ , °C | $H_{cs}$ , А/м | $M_{rs}$ , кА/м | $M_s$ , кА/м |
|------------|----------------|-----------------|--------------|
| 150        | 2960           | 840             | 1575         |
| 200        | 2650           | 875             | 1585         |
| 250        | 1780           | 907             | 1644         |
| 300        | 1490           | 883             | 1642         |
| 350        | 1440           | 852             | 1651         |
| 400        | 1320           | 915             | 1650         |
| 450        | 1220           | 1050            | 1648         |
| 500        | 1150           | 1186            | 1643         |
| 550        | 1200           | 1214            | 1638         |
| 600        | 1160           | 1186            | 1630         |
| 650        | 1050           | 1178            | 1607         |
| 700        | 950            | 1178            | 1602         |

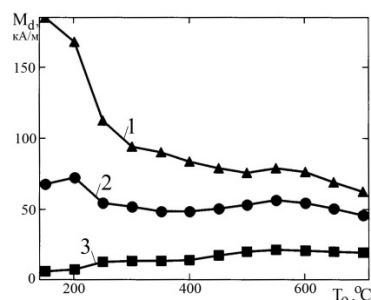


Рисунок – Зависимость остаточной намагниченности  $M_d$  шпилек и из стали 40X от температуры  $T_0$  их отпуска при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи в поле  $H_c$  напряженностью 30 кА/м (1), 10 кА/м (2) и 3 кА/м (3). Расчет по разработанной методике

Результаты, представленные на рисунке показывают, что характер зависимости  $M_d(T_0)$  шпилек и из стали 40X качественно зависит от напряженности  $H_c$  намагничивающего поля (по мере его снижения зависимость меняется с обратной на прямую). Но ни при какой из проанализированных  $H_c$  не удастся обеспечить монотонное изменение зависимости  $M_d(T_0)$  во всем диапазоне изменения  $T_0$ . Следовательно, для контроля качества отпуска шпилек и из стали 40X, движущихся в процессе контроля, следует

применять более сложные режимы намагничивания, например, описанные в [9], и реализующие их приборы.

Таким образом, разработанная методика позволяет анализировать влияние технологических факторов на остаточную намагниченность стальных изделий в разных условиях намагничивания, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям.

### Литература:

1. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Сандомирский, С.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия, 1996. – № 7. – С. 24–46.
3. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. / С.Г. Сандомирский – Минск: Беларуская навука, 2015. – 244 с.
4. Сандомирский, С.Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в разомкнутой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1997. – № 8. – С. 50–59.
5. Сандомирский, С.Г. Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия, 1998. – № 7. – С. 72–81.
6. Сандомирский, С.Г. Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Электричество. – 2016. – № 12. – С. 39–43.
7. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
8. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
9. Сандомирский, С.Г. Совершенствование методики магнитного контроля изделий массового производства из среднеуглеродистых легированных сталей / С.Г. Сандомирский // Приборостроение–2015: материалы 8-й междунар. научно-технич. конф., в 2 томах, Минск, 25–27 ноября 2015 / Мн.: БНТУ. – Т. 2. – С. 131–133.

УДК 621.317.39

## МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ПЛОТНОСТИ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕМНЫХ СВЧ РЕЗОНАТОРОВ

Сердюк В.М., Титовицкий И.А.

*Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Основные характеристики бумажных материалов – это их влажность и поверхностная плотность, т. е. масса единицы площади. Они в значительной степени определяют качество таких материалов, а потому на всех технологических этапах бумажного производства контролю данных характеристик уделяется большое внимание. Для измерения влажности и плотности бумаги используются различные методы, но в условиях непрерывного технологического процесса вне конкуренции оказываются электромагнитные датчики влажности, которые используют явление изменения параметров проникающих электромагнитных полей при прохождении диэлектрического материала [1]. Такие датчики характеризуются высокой точностью измерений, стабильностью работы при разных температурах, а также возможностью работы в непрерывном режиме постоянного движения тестируемого бумажного полотна, что очень важно для производства. Среди подобных датчиков наибольшее распространение получили датчики резонаторного типа. В них для определения влажности плоского бумажного листа используется изменение резонансной частоты и добротности (коэффициента затухания) резонансных колебаний, которые наблюдаются при внесении тестируемого диэлектрического материала внутрь резонатора [2]. И хотя для этого приходится дополнительно прорезать щели в корпусе резонатора, превращая закрытый резонатор в частично открытый, все равно основная часть резонансного поля остается сосредоточенной внутри его объема, а потому резонаторные датчики характеризуются очень малыми потерями на излучение во внешнее пространство и очень малым влиянием внешних помех на процесс измерения.

Основная проблема применения резонаторных датчиков заключается в следующем. Наряду с влажностью тестируемых материалов, и не только бумажных, неизвестной величиной обычно является также их плотность, которая оказывает подобное воздействие на электромагнитные параметры проходящего излучения, и разделить влияние этих двух параметров, влажности и плотности, аппаратными методами никак не удастся [3]. Отсюда возникает идея осуществить такое разделение вкладов каждого из них уже на этапе математической обработки калибровочных данных путем применения специальных программных методов. В данном сообщении предлагается новый метод математической обработки измеренных значений частоты и амплитудного затухания электромагнитных полей для совмест-

ного определения влажности и плотности бумажного листа посредством объемных цилиндрических СВЧ резонаторов.

Для определения влажности и плотности материала по измерениям резонансной частоты и добротности необходимо знать функциональную зависимость между этими параметрами. Она определяется на этапе калибровки, когда для измерений параметров поля используются тестовые образцы материала с заранее известной влажностью и плотностью, которые устанавливаются независимо весовыми методами. Таким путем определяется табличная зависимость резонансной частоты и коэффициента затухания от искомых параметров материала. Ее необходимо экстраполировать на весь интервал возможных значений исходных и измеряемых параметров, т. е. построить полноценные функциональные зависимости параметров поля от параметров материала, которые ниже называются калибровочными. Такие функции строятся либо в виде локально-кусочных сплайн-аппроксимаций, каждая из которых привязана к отдельным значениям калибровочной таблицы, либо в виде глобального полинома, который аппроксимирует калибровочные функции сразу по всему интервалу. Коэффициенты данного полинома, как и коэффициенты локальных сплайн-аппроксимаций, определяются на основе метода наименьших квадратов по данным калибровочной таблицы.

Но конечной целью рабочих измерений является определение именно параметров материала по измерениям параметров поля. То есть необходимо установить обратную функцию по отношению к прямой калибровочной функции, которая давала зависимость параметров поля от параметров материала. Установление такой функции является довольно сложной задачей, поскольку исходные калибровочные функции являются существенно нелинейными, как для объемных резонаторов, так и для большинства других приборов измерения параметров разных материалов. Таким образом, для определения влажности и плотности приходится решать систему двух нелинейных уравнений, составленных на основе калибровочных функций. Более того, у СВЧ резонаторов две таких функции для резонансной частоты и добротности зависят от влажности и плотности очень похожим образом, так что данная система оказывается еще и плохо обусловленной, т. е. попытки непосредственного ее решения стандартными численными методами не дают адекватного решения.

До сих пор во всем мире эту трудность обходили путем применения дополнительных приборов независимого измерения массы, чаще с помощью радиационных плотномеров. Их принцип работы основан на ослаблении радиоактивного бета-излучения при прохождении слоя вещества. А если плотность бумаги известна, то одно из калибровочных уравнений СВЧ резонатора относительно влажности уже решается без особого труда. Таким образом, для определения влажности и плотности бумажных материалов приходится применять сразу два независимых датчика – радиационный плотномер и СВЧ влагомер, что существенно усложняет и аппаратную реализацию, и сертификацию измерительной системы.

Но есть и другой путь: попытаться преобразовать систему плохо обусловленных уравнений таким образом, чтобы она допускала устойчивое решение сразу для двух неизвестных величин, влажности и плотности. Оказалось, что подобное преобразование построить можно. Нужно только усилить различия между двумя калибровочными функциями влажности и плотности, чтобы их зависимости от этих параметров материала существенно различались между собой. Для этого применялись тождественные линейные и нелинейные преобразования исходных калибровочных функций с участием коэффициентов их полиномиальной аппроксимации по двум аргументам; это параметры, также определяемые на этапе калибровки. Таким путем удалось преобразовать данные функции в новые, первая из которых почти не зависит от плотности, а вторая зависит от нее практически линейно. В результате получились уравнения, которые допускают устойчивые адекватные решения.

Для оценки точности предлагаемого метода проводилась апробация предлагаемого метода определения влажности и плотности бумажных материалов на основе математического моделирования процессов калибровки и измерений с применением цилиндрических резонаторов СВЧ. Для этого использовались теоретические модели [4] и данные по комплексной диэлектрической проницаемости бумаги в зависимости от влажности [5], а вариации ее поверхностной плотности моделировались изменениями ее толщины. Результаты проведенных вычислений показали, что уже в первом приближении абсолют-

ная погрешность определения влажности, выражаемой в процентах, составляет менее 0,1, и относительная погрешность определения плотности не превышает этой же величины, что вполне приемлемо для практических применений. Указанные значения погрешностей определения влажности и плотности могут быть снижены более чем на порядок путем дополнительного применения уточняющего алгоритма.

Таким образом, в данной работе показана возможность совместного определения влажности и плотности бумажных материалов с помощью измерений резонансной частоты и затухания резонансных колебаний цилиндрических резонаторных СВЧ датчиков. Предлагаемый метод такого определения дает достаточно высокую точность получения искомых параметров тестируемых материалов, а его внедрение позволит существенно упростить и удешевить конструкцию промышленных датчиков влажности и плотности.

#### Литература

1. Nyfors E., Vainikainen P/ Industrial microwave sensors. – Norwood: Artech Hous, 1989. – 352 p.
2. Беляиц А.Ч., Титовицкий И.А., Сердюк В.М. Электродинамический метод измерения влажности и плотности бумажного полотна в процессе производства. – Приборостроение–2014. Материалы 7-й Международной научно-технич. конф. 19–21 ноября 2014 года, Минск, Беларусь. – Минск : БНТУ. – 2014. – С. 252–254.
3. Kupfer K. Methods of density-independent moisture measurements // Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Edited by Klaus Kupfer. – Berlin : Springer, 2005. – P. 135–168.
4. Kukharchik P.D., Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Diffraction of hybrid modes in a cylindrical cavity resonator by a transverse circular slot with a plane anisotropic dielectric layer // Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 3. – P. 73–94.
5. Kukharchik P.D., Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Effect of continuous modification of dielectric order in paper. – Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by S. Okamura, N. Sobue, S. Yagihara and Y. Zhang. – Hamamatsu : ISEMA, 2007. – P. 47–54.

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Степаненко Д.А.<sup>1</sup>, Емельянова А.С.<sup>2</sup>, Плескач М.А.<sup>3</sup>, Солодка Н.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>ООО «Елена Беляева, Нина Васильева и партнеры», Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>ОАО «Завод «Электронмаш», Минск, Республика Беларусь<sup>4</sup>ООО «СВ Велор», Минск, Республика Беларусь

В статье рассматриваются методика и результаты оптимизации составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний, состоящих из нескольких последовательно соединенных сегментов из материалов с различным волновым сопротивлением. Расчет и проектирование таких концентраторов могут осуществляться путем решения дифференциальных уравнений их колебаний или с помощью метода передаточных матриц [1, 2]. Преимуществами кольцевых концентраторов по сравнению с обычно применяемыми стержневыми являются простота изготовления, малые габаритные размеры и масса.

Задача оптимизации состояла в следующем. Необходимо было для заданной моды колебаний двухсегментного концентратора определить центральный угол  $2\varphi_0$  входного сегмента, при котором обеспечивается максимальный коэффициент  $K$  усиления колебаний по амплитуде. Задача решалась с использованием метода передаточных матриц. Частота колебаний варьировалась в диапазоне  $f = 20..30$  кГц с шагом  $\Delta f = 20$  Гц, а угол  $\varphi_0$  – в диапазоне  $\varphi_0 = 0..180^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi_0 = 0,36^\circ$ . Свойства материалов и геометрические параметры сегментов были приняты теми же, что и в предшествующих исследованиях [2]: радиус средней линии  $R = 29$  мм; толщина в радиальном направлении  $h = 2$  мм; модули упругости материалов сегментов  $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па (сталь),  $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11}$  Па (бронза); плотности материалов сегментов  $\rho_1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 8300$  кг/м<sup>3</sup>. Для каждой пары значений частоты и угла рассчитывался определитель

$$\det \begin{pmatrix} T_{12}(\varphi_0, f) & T_{14}(\varphi_0, f) & T_{15}(\varphi_0, f) \\ T_{32}(\varphi_0, f) & T_{34}(\varphi_0, f) & T_{35}(\varphi_0, f) \\ T_{62}(\varphi_0, f) & T_{64}(\varphi_0, f) & T_{65}(\varphi_0, f) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

составленный из элементов передаточной матрицы  $T(\varphi, f)$ . Резонансные кривые на плоскости  $(\varphi_0, f)$  определялись как линии, вдоль которых определитель (1) обращается в нуль. Из множества резонансных кривых, соответствующих множеству мод колебаний концентратора, была выбрана одна, соответствующая моде со знакопостоянной амплитудой радиальных колебательных смещений: как было показано ранее [2], усиление колебаний по амплитуде обеспечивается только при работе концентратора на таких модах. Для выбора необходимой резонансной кривой использовались результаты ранее выполненных расчетов [2], согласно которым одна из мод со знакопостоянной амплитудой

возникает при  $\varphi_0 = 45^\circ$  и  $f = 22,75$  кГц. Для выбранной моды колебаний рассчитывалась передаточная матрица концентратора на резонансной частоте  $f_{рез}$  в зависимости от угла  $\varphi_0$ :

$$T_{рез}(\varphi_0) = T(\varphi_0, f_{рез}(\varphi_0))$$

Коэффициент усиления рассчитывался по формуле:

$$K(\varphi_0) = \left| W_0(\varphi_0) T_{рез22}(\varphi_0) + N_0(\varphi_0) T_{рез24}(\varphi_0) + M_0(\varphi_0) T_{рез25}(\varphi_0) \right|,$$

где  $W_0$ ,  $N_0$ ,  $M_0$  – значения амплитуды радиальных колебательных смещений, продольной силы и момента во входном поперечном сечении концентратора  $\varphi = 0$ , определяемые из уравнения

$$\begin{pmatrix} T_{рез12}(\varphi_0) & T_{рез14}(\varphi_0) & T_{рез15}(\varphi_0) \\ T_{рез32}(\varphi_0) & T_{рез34}(\varphi_0) & T_{рез35}(\varphi_0) \\ T_{рез62}(\varphi_0) & T_{рез64}(\varphi_0) & T_{рез65}(\varphi_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_0 \\ N_0 \\ M_0 \end{pmatrix} = 0$$

Амплитуда  $W_0$  может быть задана произвольным образом, например,  $W_0 = 1$ , а амплитуды  $N_0$  и  $M_0$  рассчитаны по формулам

$$N_0(\varphi_0) = \frac{-T_{рез32}(\varphi_0) \cdot \frac{T_{рез15}(\varphi_0)}{T_{35}(\varphi_0)} + T_{рез12}(\varphi_0)}{T_{рез34}(\varphi_0) \cdot \frac{T_{рез15}(\varphi_0)}{T_{рез35}(\varphi_0)} - T_{рез14}(\varphi_0)} \times \\ \times W_0(\varphi_0), \\ M_0(\varphi_0) = -\frac{T_{рез12}(\varphi_0)}{T_{рез15}(\varphi_0)} W_0(\varphi_0) - \\ - \frac{T_{рез14}(\varphi_0)}{T_{рез15}(\varphi_0)} N_0(\varphi_0).$$

В результате расчетов была получена кривая зависимости коэффициента усиления от угла  $\varphi_0$ , представленная на рисунке 1. Как видно, зависимость  $K(\varphi_0)$  характеризуется наличием трех максимумов при углах  $51,48^\circ$ ,  $93,6^\circ$  и  $138,96^\circ$ , которым соответствуют коэффициенты усиления 1,57, 2,3 и 1,94.

Точное определение оптимальных значений угла  $\varphi_0$  затрудняется колебательными артефактами на расчетной кривой  $K(\varphi_0)$ , причины возникновения которых требуют дополнительных исследований. Резонансные частоты для концентраторов с оптимальными значениями угла  $\varphi_0$  составляют 22,9 кГц, 24,01 кГц и 25,97 кГц. При углах  $\varphi_0 = 0^\circ$  и  $\varphi_0 = 180^\circ$ , соответствующих выполненным из одного материала концентраторам, коэффициент усиления составляет  $K = 1$ . На рисунке 2 представлены расчетные собствен-

ные формы колебаний концентраторов с оптимальными значениями угла  $\varphi_0$ .

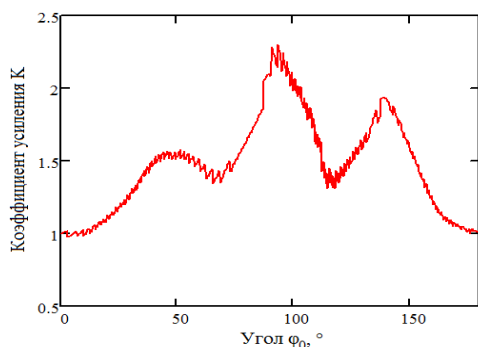
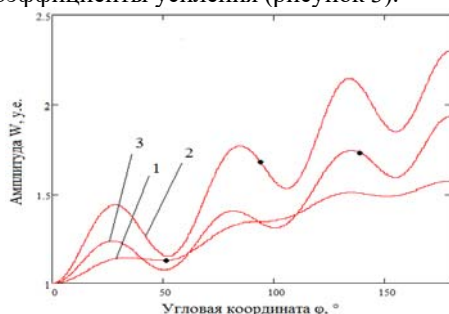
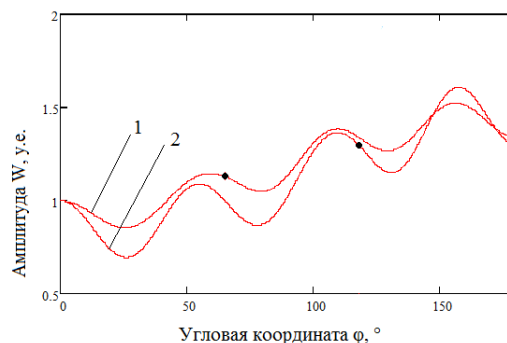


Рисунок 1 – Расчетная зависимость коэффициента усиления от угла  $\varphi_0$

Как видно, все расчетные собственные формы имеют одинаковое число максимумов амплитуды  $n = 7$  (на рисунке показаны только максимумы, находящиеся на половине длины окружности), что соответствует выбору одной моды колебаний при расчете. Границы сегментов обозначены на рисунке 2 точками на кривых. Для кривой 1 на входном сегменте находятся 2 максимума амплитуды и 5 максимумов – на выходном сегменте; для кривой 2: 4 максимума на входном сегменте и 3 максимума – на выходном; для кривой 3: 6 максимумов на входном сегменте и 1 максимум – на выходном. Для собственных форм, для которых на выходном сегменте находится четное число максимумов амплитуды, наблюдаются минимальные коэффициенты усиления (рисунок 3).



1 –  $\varphi_0 = 51,48^\circ$ , 2 –  $\varphi_0 = 93,6^\circ$ , 3 –  $\varphi_0 = 138,96^\circ$   
Рисунок 2 – Расчетные собственные формы колебаний концентраторов с оптимальными значениями угла  $\varphi_0$



1 –  $\varphi_0 = 65,52^\circ$ , 2 –  $\varphi_0 = 118,08^\circ$   
Рисунок 2 – Расчетные собственные формы колебаний концентраторов с минимальными значениями коэффициента усиления

Это объясняется тем, что из соображений геометрической симметрии в выходном сечении концентратора  $\varphi = 180^\circ$  должен находиться экстремум амплитуды, который при наличии на выходном сегменте четного числа максимумов может быть только минимумом.

Таким образом, показано, что для заданной моды колебаний двухсегментного концентратора зависимость коэффициента усиления от угла  $\varphi_0$  имеет множество минимумов и максимумов, соответствующих различному распределению числа максимумов амплитуды между входным и выходным сегментами. Максимальные значения коэффициента усиления при нечетном общем числе  $n$  максимумов амплитуды наблюдаются, когда на выходном сегменте находится нечетное число максимумов амплитуды.

### Литература

1. Степаненко, Д.А. Теоретическое обоснование возможности усиления ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2017, 2. – 13 с.
2. Степаненко, Д.А. Исследование характеристик составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2018, 2. – 11 с.

УДК 621.822.71

## КОЛЬЦЕВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Щетникович К.А., Судникович К.А., Окопчук Я.В

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Основным достоинством обработки шариков соосным инструментом является качественная приработка шариков к диску. Шарик относительно инструмента перемещаются по концентрическим кольцевым дорожкам тороидальной формы, и возрастающая площадь контакта спо-

собствует повышению точности шлифования или доводки изделий. Рассматриваемый метод чувствителен к погрешностям формы и размеров исходных заготовок. В начальный период обработки давление инструмента на шарики распределяется неравномерно и большие динамические



нагрузки могут вызвать повреждение заготовок из хрупких неметаллических материалов, имеющих максимальные размеры в партии.

В подшипниковой промышленности применяется шлифование шариков диском с окном и элеваторный метод обработки шариков, позволяющий шлифовать крупные партии заготовок [1]. Однако, при входе шариков в рабочую зону возникают ударные нагрузки и к прочности заготовок предъявляются повышенные требования. При шлифовании шариков из хрупких материалов элеваторным методом необходимо увеличить податливость инструмента для снижения динамических нагрузок, особенно при входе в зону обработки.

Инструмент для шлифования шариков 12 (рисунок 1) включает нижний приводной диск 11 закреплённый на шпинделе 13 и верхний неподвижный прижимной диск сборной конструкции, устанавливаемый на оправке 7.

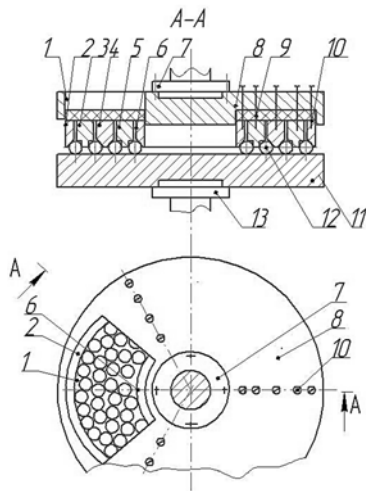


Рисунок 1 – Конструкция инструмента для шлифования шариков

В состав верхнего диска входят концентрические кольца 2,3,4,5 и 6, которые закреплены на круглой пластине 8, имеющей секторообразное окно 1. Кольца крепятся к круглой пластине через эластичную подложку 9 винтами 10. Наружное 2 и внутреннее 6 кольца выполнены цельными, а средние кольца 3, 4 и 5 имеют секторообразный вырез с тем же центральным углом, как и окно круглой пластины. Загрузочное окно в верхнем диске обеспечивает ввод шариков в зону обработки и их перемешивания после вывода из неё. В результате обрабатываемая партия шариков имеет точностные параметры одного уровня точности.

Кольцевые дорожки для размещения шариков имеют трапециевидный профиль и образованы горизонтальной поверхностью нижнего диска, коническими фасками и проточками на торцевой поверхности колец. Контакт шарика с инструментом по четырём поверхностям вызывает его

неизбежное скольжение хотя бы по одной из них. Как показано в [2] скорость скольжения более чем в 2,5 раза превышает максимальную скорость дифференциального проскальзывания по дугам контакта с дисками. Высокая скорость скольжения шариков относительно рабочих поверхностей дисков обеспечивает быстрый съём припуска с заготовок.

Максимальному динамическому воздействию заготовки подвергаются в момент входа на кольцевую дорожку. Из-за натяга в технологической системе происходит столкновение нижнего и верхнего дисков через промежуточный элемент – заготовку шариков. Величина силы, действующей на заготовку пропорциональна скорости сближения дисков и массе соударяемых через промежуточный элемент тел [3]. При сборной конструкции верхнего диска силовое воздействие на заготовку оказывает не вся масса диска с деталями крепления, а только два соседних кольца, установленных на эластичной подложке. Вследствие малой массы концентрических колец и их податливости в вертикальном направлении ударные нагрузки на шарики значительно уменьшается.

Линейные скорости нижнего диска с увеличением диаметра кольцевых дорожек возрастает, поэтому рабочие поверхности инструмента на периферии изнашиваются быстрее. Если оба диска цельные, то это приводит к увеличению натяга рабочих поверхностей дисков с шариками на внутренних кольцевых дорожках по сравнению с наружными и снижением интенсивности обработки на последних. При сборной конструкции верхнего прижимного диска кольца между собой жестко не связаны и установлены на эластичной подложке, что значительно уменьшает неравномерность натяга на разных кольцевых дорожках. Большая податливость колец в вертикальном направлении обеспечивает необходимую интенсивность шлифования на каждой дорожке вплоть до момента восстановления формы изношенных рабочих поверхностей инструмента.

Таким образом, сборная конструкция верхнего диска с отдельными кольцами, установленными на эластичной подложке, позволяет уменьшить ударные нагрузки на заготовки в момент входа в зону обработки. Количество шариков из хрупких материалов в обрабатываемой партии значительно увеличивается, так как шлифование заготовок можно выполнить диском с окном, а при наличии загрузочного устройства — элеваторным методом. Интенсивность обработки шариков на каждой кольцевой дорожке поддерживается на достаточно высоком уровне вследствие выравнивания величины натяга заготовок с инструментом несмотря на неравномерность его изнашивания.

### Литература

1. Олендер Л.А. Технология и оборудование шарикового производства / Л.А. Олендер. – Минск: Высшая школа, 1974. – 336 с.
2. Щетникович К.Г. Влияние осевой нагрузки на изменение условий скольжения при доводе

шариков сборным инструментом // Вестник машиностроения. – 2010. – № 1. – С. 13–17.

3. Филонов И.П. Механика процессов обкатки / Филонов И.П. – Минск : Наука и техника, 1985. – 328 с.

УДК 620.179.14

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 9ХФМ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Счастный А.С., Короткевич З.М., Бурак В.А., Осипов А.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Важной задачей при создании режущих инструментов для деревообработки является контроль качества термообработки изделий из инструментальных легированных сталей. Отжиг является одним из основных видов термической обработки, которая позволяет уменьшить структурные неоднородности, снизить внутренние напряжения материала после либо до его механической обработки. При термообработке инструментальных легированных сталей температура отжига оказывает влияние на предел прочности и твердость, причем это влияние неоднозначно и зависит от ряда факторов. Контроль температуры отжига позволяет повысить качество, как изготавливаемой продукции, так и технологичность производства.

Применение стандартных неразрушающих магнитных методов для контроля отжига изделий и материалов из инструментальных сталей оказалось затруднительно из-за неоднозначной связи между их магнитными параметрами и температурой отжига. Большие возможности для решения данной задачи имеет многопараметровый импульсный магнитный метод [1, 2], заключающийся в намагничивании испытуемого объекта сериями импульсов магнитного поля с изменяющейся амплитудой и полярностью.

Исследовалось влияние температуры отжига образцов инструментальной легированной стали 9ХФМ (размером  $175 \times 175 \times 2,6 \text{ мм}^3$ ) на градиент напряженности поля остаточной намагниченности при их импульсном намагничивании. Образцы были подвергнуты отжигу при температурах от 20 до 800 °С.

Использовались два метода измерения. В первом случае намагничивание и измерение осуществлялось прибором ИМА-М [3]. Во втором случае намагничивание производилось рядом батареи конденсаторов блока ИМА-5Б [4] на прямоугольные катушки, которые имели размеры  $100 \times 35 \text{ мм}^2$ , расстояние между центрами катушек составляло 100 мм. Измерения осуществлялись градиентометром с параллельным расположением ползунов, подключенных к прибору ИМА-4М [4, 5].

Преобразователь ИМА-М устанавливался в центр исследуемого образца, а затем производилось намагничивание тремя сериями импульсов первого цикла, максимальная амплитуда намагничивающего импульса имела значение  $5,22 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ .

Полученные зависимости для  $\nabla H_{rn0}$ ,  $\nabla H_{rnm}$ ,  $\nabla H_{rn}$ ,  $\nabla H_{rms}$  и  $\nabla H_{rpi}$  представляют собой семейство однотипных кривых, которые в случае градиентов напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_{rn0}$ ,  $\nabla H_{rnm}$ ,  $\nabla H_{rn}$  представлены на рисунке 1.

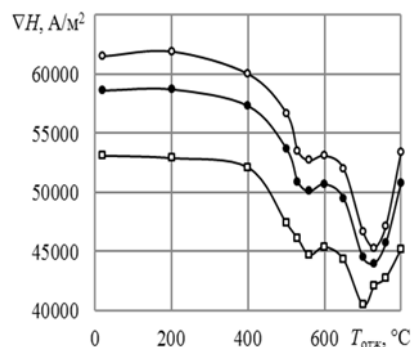


Рисунок 1 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_{rn0}$  – (1),  $\nabla H_{rnm}$  – (2),  $\nabla H_{rn}$  – (3) от температуры отжига образцов стали 9ХФМ

По полученным данным была построена математическая линейная модель для температуры отжига в зависимости от градиента напряженности поля остаточной намагниченности вида:

$$T_{отж. п.} = b_0 + b_1 \cdot \nabla H_{rn} + b_2 \cdot \nabla H_{rnm} + b_3 \cdot \nabla H_{rms} + b_4 \cdot \nabla H_{rn0} + b_5 \cdot \nabla H_{rpi}, \quad (1)$$

где  $b_0 \dots b_5$  – коэффициенты уравнения.

Коэффициент множественной корреляции, для данной математической модели равен  $R = 0,951$  и приведенная относительная погрешность восстановления  $T_{отж}$  равна  $\gamma = 18 \%$ , а среднеквадратическое отклонение  $S = 97 \text{ °С}$ . Приведенная относительная погрешность восстановления вычисляется по формуле для коэффициента множественной корреляции  $R > 0,9$  согласно [6]

$$\gamma^2 = (1-R^2)/3 \quad (2)$$

Прямоугольные катушки устанавливались в центр исследуемого образца. Намагничивание осуществлялось последовательностью импульсов разных направлений с амплитудами, равными 210, 70, 35, -35, -50, 35, -35, -70, 35, -35, -100 кА/м. Катушки были подключены последовательно по направлению магнитного поля в исследуемом образце и располагались так, чтобы намагничивание осуществлялось вдоль направления прокатки исследуемого листа. При таком способе намагничивания используется направленное магнитное поле вместо радиально-симметричного, а используемые импульсы имели более затянутый задний фронт, что позволяет снизить влияние вихревых токов на измеряемый параметр.

Полученные зависимости представляют собой семейство однотипных кривых, на рисунке 2 представлены значения градиента напряженности поля остаточной намагниченности, измеренные после намагничивающих импульсов амплитудой 210, 70 и 35 кА/м для  $\nabla H_{rn210}$ ,  $\nabla H_{rn70}$ ,  $\nabla H_{rn35}$  соответственно.

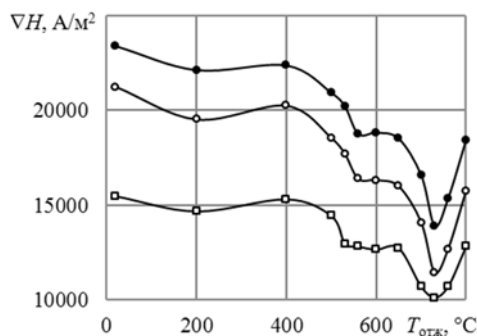


Рисунок 2 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_{rn70}$  – (1),  $\nabla H_{rn210}$  – (2),  $\nabla H_{rn35}$  – (3) от температуры отжига образцов стали 9ХФМ

По полученным данным была построена математическая линейная модель для температуры отжига в зависимости от градиента напряженности поля остаточной намагниченности вида:

$$T_{отж.р.} = b_0 + b_1 \cdot \nabla H_{rn210} + b_2 \cdot \nabla H_{rn70} + b_3 \cdot \nabla H_{rn35} + b_4 \cdot \nabla H_{rn-35} + b_5 \cdot \nabla H_{rn-50} + b_6 \cdot \nabla H_{rn35} + b_7 \cdot \nabla H_{rn-35} \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции для данной линейной математической модели составил  $R = 0,984$  и приведенная относительная погрешность восстановления  $T_{отж}$  равна  $\gamma = 10\%$  по формуле (2), а среднеквадратическое отклонение  $S = 68\text{ }^\circ\text{C}$ .

При оценке математической модели установлено, что приведенная погрешность восстановления  $T_{отж}$  по второй математической модели

( $\gamma = 10\%$ ) выше, чем при использовании первой математической модели ( $\gamma = 18\%$ ).

Как видно из рисунков 1 и 2, полученные зависимости имеют схожий характер хода при температурах отжига свыше  $530\text{ }^\circ\text{C}$ , следует отметить, что при температуре отжига  $400\text{ }^\circ\text{C}$  зависимости на рисунке 2 имеют экстремум в отличие от зависимостей на рисунке 1, где наблюдается их плавный ход. На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что использование направленного намагничивания с изменяющейся амплитудой и полярностью является более предпочтительным.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что для оценки температуры отжига инструментальной легированной стали 9ХФМ может быть использован импульсный магнитный метод контроля. Причем большую достоверность для данной стали имеет второй из рассмотренных методов.

### Литература

1. Мельгуй, М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации. Ч.1. Многопараметровая магнитная структуроскопия с использованием параметров петли магнитного гистерезиса в замкнутой магнитной цепи электромагнит-изделие. Обзор. / М.А. Мельгуй // Дефектоскопия, 2015. – № 2. – С. 27–34.
2. Мельгуй, М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации. Ч.2. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации / М.А. Мельгуй // Дефектоскопия, 2015. – № 3. – С. 11–20.
3. Матюк В.Ф. Разработка нового прибора для магнитной структуроскопии на основе особенностей гистерезиса остаточной намагниченности при импульсном перемагничивании изделия / В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй // Приборы и методы измерений, 2011. – № 1(2). – С. 17–24.
4. Мельгуй, М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М.А. Мельгуй [и др.] // Научно технические достижения, 1990. – № 4. – С. 41–44.
5. Счастный, А.С. Исследование влияния параметров намагничивания на градиент напряженности поля остаточной намагниченности при контроле коэффициента нормальной анизотропии / А.С. Счастный, В.А. Бурак, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика, 2017. – № 3. – С. 37–49.
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

УДК 621.793.2:539.234

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК ИЗ $TiB_2+20\% TiC$ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННОЙ МИШЕНИ

Телеш Е.В., Лам Н.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Интенсивно развивающимся разделом науки и техники является инженерия поверхности для формирования наноструктурных тонкопленочных покрытий. Такие пленки успешно применяются в качестве защитных, износостойких, жаропрочных, биосовместимых покрытий, в качестве материалов для тонкопленочных резисторов и т. п. Композиты, которые объединяют бориды и карбиды, обеспечивают привлекательное сочетание превосходных механических и электрических свойств и коррозионной стойкости, особенно при относительно высоких температурах и в агрессивных средах [1].  $TiB_2$  и  $TiC$  являются ковалентными соединениями и обладают высокими твердостью и коррозионной стойкостью.  $TiB_2$  и  $TiC$  являются важными материалами для высокотемпературных применений из-за их высоких точек плавления, твердости, модуля упругости и электрической проводимости и относительно низкого коэффициента теплового расширения [2].

Формирование покрытий осуществляли на модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащенной ионным источником на базе ускорителя с анодным слоем и диффузионным насосом, что обеспечило получение остаточного вакуума  $(2-3) \cdot 10^{-3}$  Па. Мишень состава  $TiB_2+20\% TiC$  имела диаметр 80 мм и толщину 6 мм. Покрытия наносились на подложки из окисленного кремния, кремния. В качестве рабочего газа использовался аргон. Остаточный вакуум составлял  $3,2 \cdot 10^{-3}$  Па, рабочее давление аргона  $-(5,3-8,2) \cdot 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение  $-3,0$  кВ, температура подложки  $-320-573$  К. Толщина покрытий измерялась с применением микроскопа МИИ-4, удельное поверхностное сопротивление – с использованием ИУС-3М. Микротвердость по шкале Кнуупа определяли на микротвердомере Leica VMHT MOT.

На рисунке 1 приведена зависимость скорости нанесения  $V_n$  от величины тока на мишени  $I_M$ . Наблюдалось монотонное увеличение  $V_n$  с 0,29 до 0,67 нм/с при росте  $I_M$  с 25 до 92 мА. Следует отметить, что пленки наносились на неподвижную подложку. Расстояние мишень–подложка составляло  $\sim 80$  мм.

На рисунке 2 представлена зависимость удельного объемного сопротивления  $\rho_v$  пленок от тока мишени (скорости нанесения).

При  $V_n = 0,29$  нм/с  $\rho_v$  составляло  $\sim 3 \cdot 10^6$  мкОм·см, а пленки имели радужную окраску. Это можно объяснить взаимодействием

распыленных атомов мишени с газами остаточной атмосферы ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  и др.) при низкой скорости нанесения. Повышение  $V_n$  способствовало резкому снижению удельного объемного сопротивления и получению покрытий с металлическим блеском.

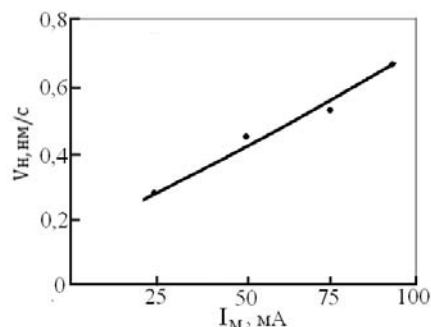


Рисунок 1 – Влияние тока мишени на скорость нанесения покрытий из  $TiB_2+20\% TiC$

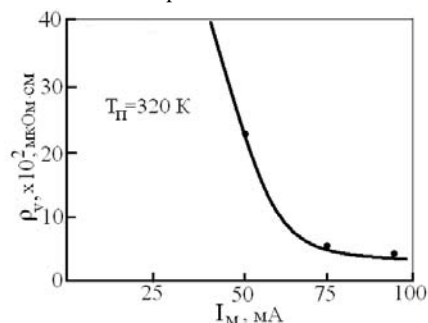


Рисунок 2 – Влияние тока мишени на удельное объемное сопротивление пленок из  $TiB_2+20\% TiC$

Увеличение температуры подложки  $T_{II}$  до 473 К способствовало снижению  $\rho_v$ , что можно объяснить некоторым ростом размеров кристаллитов, уплотнением структуры покрытия, десорбцией аргона и активных газов из пленки. Однако дальнейшее повышение  $T_{II}$  привело к резкому возрастанию  $\rho_v$ . Это может быть связано с более высокой степенью окисления конденсирующихся атомов (рисунок 3).

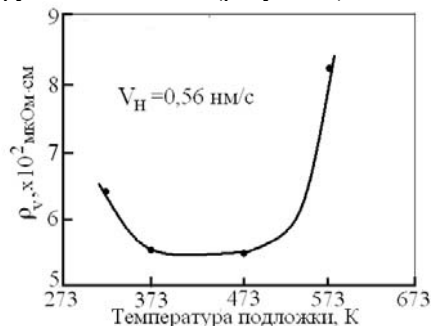


Рисунок 3 – Влияние температуры подложки на удельное объемное сопротивление пленок из  $TiB_2+20\% TiC$



Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки

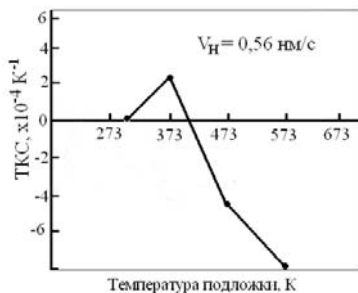


Рисунок 5 – Зависимость ТКС пленок TiB<sub>2</sub>+20% TiC от температуры подложки

Измерение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) пленок показало, что повышение  $V_n$  способствует снижению ТКС до  $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  (рисунок 4). Покрyтия наносились при  $T_n = 313 \text{ K}$ .

В тоже время повышение  $T_n > 373 \text{ K}$  приводит к переходу к отрицательным значениям ТКС (рисунок 5). Это можно связать с окислением поверхности кристаллитов и образованием пленок из оксидов титана и бора, наличие которой способствует

механизму токопереноса путем туннелирования электронов через диэлектрический барьер.

На рисунке 6 представлена зависимость микротвердости пленок от температуры подложки.

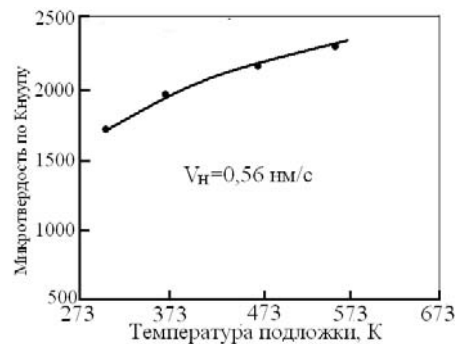


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости пленок TiB<sub>2</sub>+20% TiC от температуры подложки

Установлено, что высокая  $T_n$  способствует получению покрытий с более плотной структурой, что повышает их твердость.

### Литература

1. Shu, S. Fabrication of TiC<sub>x</sub>-TiB<sub>2</sub>/Al composite for application as a heat sink / S. Shu, H. Yang, C. Tong, F. Qiu // Materials. – 2016. – № 9. – P. 642–672.
2. Sundgren, J.E. Growth, structural characterization and properties of hard and wear-protective layered materials // J.E. Sundgren, J. Brich, G. Hakansson, I. Haltman, U. Helmersson // Thin Solid Films. – 1990. – V. 193–194. – P. 818–831.

УДК 681.5

## КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ

Уласюк Н.Н., Сычик В.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Критерий качества управления является краеугольным камнем при построении управляющих функций и всей системы управления в целом.

При проектировании управляемых систем, необходимо, прежде всего, конкретизировать:

- критерий качества управления и способ его минимизации (максимизации);
- ограничения системы и способ их удовлетворения;
- средства, обеспечивающие адаптивность управления;
- способы идентификации ненаблюдаемых координат и коррекции ошибок наблюдаемых координат, чтобы исключить автоколебательные процессы;
- способ выбора оптимальных значений параметров алгоритма управления;
- средства, гарантирующие устойчивость управляемой системы.

Без корректного ответа на эти вопросы не может быть корректно сформулирована и решена задача управления системой.

Пусть желаемые свойства движения управляемой системы для выходных координат

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$  заданы в виде многообразия

$$\Omega: w_\mu(x, t) = C_\mu, \mu = 1, \dots, m \quad (1)$$

где  $w_\mu(\cdot)$  – заданные операторы;  $C_\mu$  – константы;  $C_\mu > 0$ ;  $t$  – время.

Форма представления желаемых свойств движения системы в виде (1) не является единственно возможной. Свойства движения могут быть заданы в дифференциальной форме, например уравнениями эталонного движения:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(\bar{x}, x, t), \\ t &\geq t_o: x(t_o) = x_o, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f = (f_1, \dots, f_n)^T$ ;  $f_i(\cdot)$  – заданные операторы, в общем случае нелинейные, определяемые на нечетких множествах;  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  – вектор обобщенных координат;  $\dot{x} = (\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n)^T$  – вектор обобщенных скоростей;  $\bar{x} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)^T$  – вектор командных величин;  $x_o = (x_{1o}, \dots, x_{no})^T$  – вектор начального состояния.

В соответствии с условиями (1) либо (2) могут быть построены при определенных предположениях уравнения движения управляемой системы. Однако в широко используемых формулировках задач управления уравнения движения системы предполагаются известными с точностью до вектора управления  $u = (u_1, \dots, u_m)^T$  ( $m \leq n$ ):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x, u, t), \\ t &\geq t_o: x(t_o) = x_o, \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $F = (F_1, \dots, F_n)^T$  – вектор правых частей системы.

Критерий качества управления может быть задан также в интегральной форме. При этом требуется минимизировать выражение вида:

$$J_n = \int_{t_o}^{t_1} \left[ \tau_0^2 \varepsilon_k^2 + \tau_1^2 \dot{\varepsilon}_k^2 + \dots + \tau_n^2 \varepsilon_k^{(n)^2} \right] dt \quad (4)$$

где  $\varepsilon_k(t) = \bar{x}_k(t) - x_k(t)$  – ошибка. Используя уравнение Эйлера-Пуассона и требуя, чтобы при  $t \rightarrow \infty$  функция  $x_k(t)$  стремилась к заданной величине  $\bar{x}_k$ , а ее производные стремились к нулю, можно показать, что оптимизация системы (3) по критерию минимума интегральной квадратичной ошибки  $n$ -го порядка вида (4) сводится к требованию, чтобы выходная переменная управляемой системы изменялась в соответствии с решением линейного дифференциального уравнения  $n$ -го порядка:

$$x_k^{(n)} + \beta_{n-1} x_k^{(n-1)} + \dots + \beta_1 \dot{x}_k + \beta_0 x_k = \beta_0 \bar{x}_k, \quad (5)$$

с начальными условиями, соответствующими системе (3). Коэффициенты  $\beta_0, \dots, \beta_{n-1}$  определяются через константы  $\tau_0, \dots, \tau_n$ , входящие в критерий (4). Таким образом, критерий качества в интегральной форме (4) можно представить в дифференциальной форме (5) и наоборот.

Уравнение (5) можно рассматривать как исходное уравнение эталонного движения. В общем случае, желаемые свойства движения управляемой системы могут задаваться нелинейными дифференциальными уравнениями вида:

$$x_k^{(n)} = f(x_k^{(n-1)}, \dots, x_k, \bar{x}_k, t), \quad (6)$$

где  $f(\cdot)$  – заданный нелинейный оператор;  $\bar{x}_k$  – заданные величины;  $k = 1, \dots, m$ .

Желаемые свойства движения управляемой системы обычно задаются линейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{x} + 2\psi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 \bar{x}, \quad (7)$$

где  $\psi$  и  $\omega_0$  – заданные константы:  $\psi \geq 0$ ,  $\omega_0 > 0$ ;  $\bar{x}$  – заданная командная величина.

#### Формирование модели эталонного движения

Этот вопрос рассматривается применительно к случаю, когда синтезируемый алгоритм управления предназначен для вывода управляемого объекта в точку  $x(\infty) = \bar{x}$ ,  $\dot{x}(\infty) = 0$ . Это означает, что дифференциальное уравнение эталонного движения должно быть принято в виде (7). Более упрощенно уравнение записывается:

$$\ddot{x}^* + \beta_1 \dot{x}^* + \beta_0 x^* = \beta_0 \bar{x}. \quad (8)$$

Коэффициенты  $\beta_0, \beta_1$  подлежат определению из условия, чтобы динамика движения эталонной системы (8) соответствовала желаемой динамике синтезируемой замкнутой системы.

При проектировании систем автоматического управления обычно бывают известны с определенной степенью приближения динамические характеристики управляемого объекта. Поэтому, оказывается возможным в требованиях к системе управления назначить длительность  $t_x$  переходных процессов по управляемой переменной  $x$  при отработке постоянных задающих воздействий, а также указать характеристики переходного процесса: перерегулирование, показатель колебательности и др. Эти данные являются исходными при определении искомым коэффициентов  $\beta_0, \beta_1$ .

Далее примем, что дифференциальные уравнения эталонной системы имеют вид:

$$\tau_x^2 \ddot{x}^* + 2\psi\tau_x \dot{x}^* + x^* = \bar{x}$$

или

$$\ddot{x}^* + 2\psi\omega_0\dot{x}^* + \omega_0^2 x^* = \omega_0^2 \bar{x}, \quad (9)$$

где

$$\tau_x = \frac{t_x}{3}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\tau_x}. \quad (10)$$

Таблица 1 – Показатели, характеризующие свойства линейного эталонного движения

| $\psi$ | $\eta$ | $\sigma, \%$ | $t_x$       |
|--------|--------|--------------|-------------|
| 1      | 0      | 0            | $5 \tau_x$  |
| 0,707  | 1,0    | 5            | $3 \tau_x$  |
| 0,50   | 1,73   | 18           | $6 \tau_x$  |
| 0,25   | 3,87   | 42           | $12 \tau_x$ |

Применительно к этим уравнениям в таблице 1 приведены числовые показатели, ха-

рактически характеризующие динамику движения. Здесь  $\psi$  – коэффициент апериодичности колебаний,  $\sigma$  – перерегулирование, а  $\eta = \psi^{-1} \sqrt{1 - \psi^2}$  – коэффициент колебательности. В случае  $\psi = 1$  уравнение (9) соответствует апериодическому звену второго порядка.

Соответствующее уравнению эталонного движения характеристическое уравнение:

$$p^2 + 2\psi\omega_0 p + \omega_0^2 = 0$$

имеет действительный корень  $p_1 = -\psi\tau_x^{-1}$  кратности 2. Показатель колебательности  $\eta = 0$ , а время переходного процесса  $t_x \approx 5\tau_x$ .

При уменьшении коэффициента затухания показатель колебательности  $\eta$  увеличивается, что приводит к перерегулированию и увеличению длительности переходных процессов  $t_x$ .

При  $\psi = \sqrt{2}/2 \approx 0,707$  показатель колебательности  $\eta = 1$ , а величина перерегулирования  $\sigma = 5\%$ . При этом длительность переходного процесса оказывается равной  $t_x \approx 3\tau_x$ . Такой переходный процесс в технике автоматических систем считают наилучшим. В случае  $\psi < \sqrt{2}/2$  показатели переходного процесса ухудшаются: увеличиваются  $\eta$ ,  $\sigma$  и  $t_x$ .

Таким образом, по заданным требованиям к управляемой системе можно указать (с помощью данных, аналогичных таблице 1) параметры уравнения эталонной системы.

Далее считают, что задана длительность  $t_x$  переходных процессов в замкнутой системе. Наряду с этим принимается, что эталонная система (8) должна обладать такими динамическими свойствами, при которых коэффициент затухания, или коэффициент демпфирования колебаний,  $\psi = \sqrt{2}/2$ . В таком случае переходный процесс  $x^*(t) \rightarrow \bar{x}$  в системе (8) будет иметь перерегулирование  $\sigma \approx 5\%$ . Параметры  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  находят из зависимости:

$$2\psi\omega_0 = \beta_1, \quad \omega_0^2 = \beta_0. \quad (11)$$

Принимая  $\psi = \sqrt{2}/2$ , формулы (11) можно записать с учетом (10) в следующем виде:

$$\beta_0 = \frac{1}{\tau_x^2}, \quad \beta_1 = \frac{\sqrt{2}}{\tau_x}. \quad (12)$$

Таким образом, параметры эталонного управления  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  вычисляются непосредственно по величине  $t_x$ , характеризующей качество переходных процессов в проектируемой системе управления.

УДК 621.306

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Глухманчук В.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для контроля качества структуры изоляционных изделий широко используются радиотехнический, ультразвуковой и методы, базирующиеся на интенсивности поглощения либо отражения от образцов высокоэнергетических частиц. Эффективным методом контроля целостности изоляционных изделий, например изделий из кожи, является электрический метод, базирующийся на измерении электрических полей и их градиентов [1].

Способ точного измерения электростатических полей [2] основан на периодическом экспонировании и экранировании помещенного в электростатическое поле металлического электрода и измерении информационного сигнала в нагрузке-затворе МДП-триодной структуры с индцированным каналом. В случае, если время экспонирования  $t_{es} = \tau_1$ , а время экранирования  $t_{ec} = \tau_2$ , где  $\tau_1$  – постоянная времени индукции на измерительном электроде максимально достижимого заряда  $q_m$ ;  $\tau_2$  – время стекания  $q_m$  через входное сопротивление МДП-структур, выходное напряжение, выделяемое

в истоковой цепи МДП-транзистора, максимальное и составляет:

$$U_{вых.} = K_1 SR_H E_x \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий площадь электрода  $S_э$  и свойства окружающей среды;  $K_1 = \epsilon_a S_э/C$ ,  $C$  – суммарная емкость системы измерительный электрод–МДП-структура. Поскольку контролируемая напряженность  $E_x = q/(4\pi\epsilon r^2)$ , то для снижения систематической погрешности необходимо обеспечить  $r = \text{const}$  и стабилизировать  $\epsilon_a$ . Реализация этих условий заложена в конструкции преобразователя электрических полей.

Контроль качества структуры и выявление дефектов в изоляционных материалах и изделиях базируется на методике, связанной с выявлением локальных участков повышенной напряженности электрического поля, излучаемого заряженной плоскостью металлических поверхностей. Механизм выявления областей нарушения целостности структуры изоляционных материалов следующий.

Гибкий изоляционный материал, в частности изделия из кожи, протягивается через круглый металлический стержень, к которому подводится высокий электрический потенциал. При выполнении неравенства  $b \gg D$ , где  $b$  – ширина изоляционного материала,  $D$  – диаметр металлического стержня, излучаемое заряженным стержнем поле  $E_2$  в местах нарушения целостности структуры, которое воздействует на измерительный электрод преобразователя электрических полей (ПЭП), находим из выражения:

$$E_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 r}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – линейная плотность заряда в металле;  $\epsilon_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;  $r$  – расстояние от стержня до электрода. При условии  $d > h$ , где  $d$ ,  $h$  – соответственно толщина изоляционного материала и воздушного зазора, что имеет место при непосредственном размещении ПЭП на поверхности изоляционного слоя, напряженность поля

$$E_1 = \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2 r}, \quad (3)$$

где линейная плотность заряда  $\tau_1 = \frac{2\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \tau$ ;  $\epsilon_2$  –

относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

Найдем усиление напряженности электрического поля в области дефекта изоляционного материала с учетом (1) и (2)

$$K_E = \frac{E_2}{E_1} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)\epsilon_2}{2\epsilon_1\epsilon_2} \cong \frac{\epsilon_2(1 + \epsilon_2)}{2} \quad (4)$$

Как следует из (4), при изменении  $\epsilon_2$  от 2 до 10  $K_E \cong 3 \dots 50$ . Следовательно, появление локальных участков повышенной напряженности  $E_x$  свидетельствует о нарушении целостности структуры контролируемых изоляционных материалов, причем области локальных полей являются местами структурных дефектов этих материалов.

При контроле устройством диагностики качества структуры кожаных изделий выносной элемент – твердотельный ПЭП, либо на дискретной МДП-структуре перемещается по поверхности находящегося под положительным потенциалом металлического стержня. Электрическое поле, создаваемое потенциалом стержня, периодически с частотой 1 кГц воздействует на стадии экспонирования на измерительный электрод ИЭ2 в режиме контроля качества структуры изоляционных материалов. На выходе ПЭП по обоим каналам формируется переменное напряжение  $U_{вых} = K \cdot E_x$ , частотой 1 кГц, где  $E_x$  – локальная напряженность электрического поля контролируемого объекта. Напряжение сигнала фильтруется от сетевых и высокочастотных помех сглаженным фильтром, настроенным на рабочую частоту электронного коммутатора. Напряжение сигнала оптимального значения по амплитуде (0,5...1,5 В) формируется в блоке многорежимных усилителей.

Типы и точность выявления дефектов в изоляционных кожаных материалах представлены в таблице.

На базе рассмотренного метода можно синтезировать ряд высокоэффективных устройств для качественного контроля целостности структуры изоляционных материалов и изделий.

| Тип контролируемого объекта | Способ выделения информации | Расстояние ПЭП от контролируемой поверхности, мм | Вид дефекта                | Порог чувствительности дефектов, В/мм | Точность выявления места дефекта, мм |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Изоляционный материал       | Амплитудно-частотный        | 0,1                                              | Сплошные трещины, раковины | 0,1...0,4                             | $\pm 0,5$                            |

### Выводы.

1. Дефектные участки изоляционных материалов, контактирующих с находящимися под постоянным напряжением металлами, генерируют градиенты напряженности электрического поля.

2. Точный контроль качества структуры диэлектрических материалов и изделий обеспечивает метод, базирующийся на оценке интенсивности электрических полей от находящихся под электрическим потенциалом контролируемых областей.

### Литература

1. Сычик В.А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур. – Мн.: Выш. Школа, 1991. – 179 с.
2. Патент России № Д010249, G01R 29/00, 1994. Способ измерения напряженности электрического поля / Сычик В.А., Воробьев В.А., Бреднев А.В.



## ЭТАЛОННЫЕ СВОЙСТВА ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ

Уласюк Н.Н., Сычик В.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

### Формулировка задачи

Пусть заданы:

- желаемые свойства движения управляемой системы в виде уравнений для координат, рассматриваемых в качестве выходных

$$\dot{x} = f(\bar{x}, x, t), \quad (1)$$

где  $f(\cdot)$  – заданный оператор, в общем случае нелинейный. В задачах типа стабилизации  $\bar{x} = const$ . В задачах типа виброзащиты  $\bar{x} = 0$ ;

- ограничения на выходные переменные исполнительных приводов:

$$q_{pi-} \leq q_{pi}(x, u, t) \leq q_{pi+}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где  $q_{pi-}$ ,  $q_{pi+}$  – соответственно нижние и верхние допустимые величины выходных переменных силовых исполнительных механизмов и преобразующих устройств;

- ограничения на выходные переменные системы либо некоторые функционалы от них (например перемещения плунжеров исполнительных механизмов в пределах допустимых их динамических ходов):

$$h_{l-} \leq h_l(x, u, t) \leq h_{l+}, \quad l = 1, \dots, L, \quad (3)$$

где  $h_l(\cdot)$  – заданные функционалы;  $h_{l-}$ ,  $h_{l+}$  – соответственно нижние и верхние допустимые значения функционалов;

- ограничения на управляющие функции:

$$u_{i-} \leq u_i(t) \leq u_{i+}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где  $u_{i-}$ ,  $u_{i+}$  – соответственно нижние и верхние допустимые значения управляющей функции;

- функции предпочтения для составляющих информационную базу системы нечетко определенных параметров  $z_i$  управляемого процесса и критерия:

$$\mu_{Ai}(z_i), \quad i = \overline{1, l}, \quad (5)$$

где  $\mu_{Ai}(z_i)$  – функция принадлежности параметра  $z_i$ :  $0 \leq \mu_{Ai}(z_i) \leq 1$ ;  $A$  – заданное множество.

Требуется: построить управляющие функции  $u_i(t)$ ,  $i = 1 \dots m$  такие, что обеспечиваются условия оптимальности движения (1) управляемой системы в каждый момент времени при удовлетворении ограничений (2)-(5) и, кроме того, гарантируется асимптотическая устойчивость управляемой системы, т. е.:

$$x(t) \rightarrow \bar{x}(t), \quad \dot{x}(t) \rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Предполагается, что функционалы  $f(\cdot)$  и  $F(\cdot)$  таковы, что обеспечивается существование и единственность решения сформулированной задачи управления.

### Эталонные свойства движения

В основе используемой теории управления и разработанных алгоритмов адаптивного управления лежат желаемые свойства движения управля-

емой переменной. Поэтому первостепенное внимание уделяется заданию упомянутых свойств, являющихся критерием качества управления.

На рисунках 1-4 приведены примеры линейных и нелинейных свойств движения для эталонных движений, задаваемых дифференциальными уравнениями первого и второго порядков, где следующие обозначения:

$q_1$  – эталонное движение выходной переменной (решение уравнений эталонного движения);

$eps$  – ошибка;

$t_c$  – желаемая длительность переходного процесса по выходной переменной при отработке постоянного командного сигнала, сек;  $\psi$  – коэффициент аperiodичности колебаний, безразмерный. В технике автоматических систем переходной процесс при  $\psi = 0,707$  считают наилучшим;  $\omega_0$  – частота малых не демпфированных колебаний линейной системы,  $1/c$ :  $\omega_0 = 3/t_c$ ;  $\Delta$  – шаг изменения соответствующего параметра.

На рисунках 1-2 приведены свойства движения (экстремали), реализуемые при линейных критериях качества для различных значений параметров  $\psi$  и  $t_c$ . Как видно, если желаемые свойства движения задаются в классе линейных критериев, оптимальному переходному процессу всегда соответствует некоторое перерегулирование. Другими словами, существует противоречие между желаемой точностью и быстродействием. Поэтому в технике автоматических систем выбирают компромиссный вариант, при котором обеспечивается ошибка порядка 5%. Этому варианту соответствует  $\psi = 0,707$ .

Таким образом, оставаясь в классе линейных критериев, невозможно повышать быстродействие системы без потери точности, так же как и повышать точность системы без потери быстродействия. Это относится ко всем системам управления, в основу функционирования которых положены линейные критерии качества. Заметим, что под линейными критериями здесь понимаются свойства движения, заданные линейными дифференциальными уравнениями.

Классические ПИ- и ПИД-регуляторы реализуют линейные свойства движения (линейные критерии качества) и поэтому ни при каких значениях параметров регулятора в принципе не могут сочетать высокое быстродействие и точность без перерегулирования. Рисунки 1-2 демонстрируют сказанное. Высокое качество управляемого процесса без перерегулирования может быть обеспечено при использовании нелинейных назначенных свойств движения управляемой системы.

На рисунке 3 и рисунке 4 приведены свойства движения, реализуемые при нелинейных критериях.

риях для различных значений параметров  $\psi$  и  $t_c$ . На рисунке 3 приведены экстремали для критерия второго порядка, а на рисунке 4 – для критерия первого порядка. Видно, что в классе нелинейных критериев представляется возможным сочетать точность и быстродействие без перерегулирования. При использовании соответствующих приводов можно реализовать любые желаемые свойства движения без потери быстродействия и точности. Это качество, присущее только нелинейным критериям, лежит в основе синтезированных алгоритмов адаптивного управления.

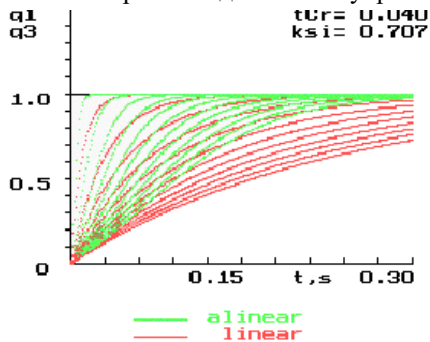


Рисунок 1 – Свойства движения (экстремали), реализуемые при линейных критериях качества второго порядка при  $t_c = 0,1$  с для различных значений параметров  $\psi$  ( $\psi = 0,15..1,0$ ;  $\Delta\psi = 0,1$ )

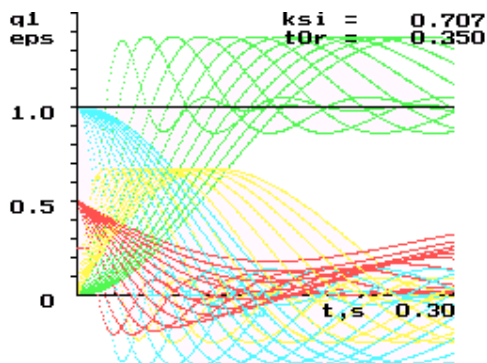


Рисунок 2 – Свойства движения, реализуемые при линейных критериях качества второго порядка при  $\psi = 0,3$  для различных значений параметра  $t_c$  ( $t_c = 0,01..0,25$  с.;  $\Delta t_c = 0,02$  с.)

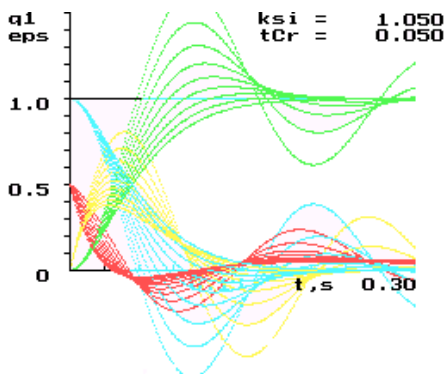


Рисунок 3 – Свойства движения, реализуемые при линейном (кривая 1) и нелинейном (кривая 2) критериях второго порядка для  $\psi = 0,707$

В рассмотренных примерах использовались нелинейные свойства движения, которым соответствуют управляемые процессы без перерегулирования при высоком быстродействии. Для полной реализации возможностей алгоритма управления, в частности обеспечения высокого быстродействия системы, необходимы соответствующие устройства, их реализующие.

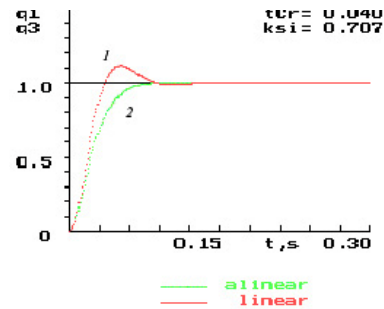


Рисунок 4 – Свойства движения, реализуемые при линейном (кривая 1) и нелинейном (кривая 2) критериях первого порядка при идентичных значениях параметров  $\psi$  и  $t_c$  ( $\psi = 0,707$ ;  $t_c = 0,05$  с.)

Также следует упомянуть о свойствах измерительных устройств. Последние, являясь динамическими звеньями, вносят запаздывание в формируемую им оценку измеряемой переменной. В связи с этим, необходимо корректировать полученные оценки, так как без компенсации запаздывания в системе возникают явления, типа автоколебательных. Поэтому целесообразно использовать соответствующие алгоритмы, обеспечивающие компенсацию недостатков используемых измерительных устройств, либо специальные алгоритмы.

Таким образом, оставаясь в классе линейных критериев, невозможно повышать быстродействие системы без потери точности, так же как и повышать точность системы без потери быстродействия. Этот основополагающий принцип лежит в основе всех линейных критериев качества. Классические ПИ- и ПИД-регуляторы реализуют, по установившейся терминологии, линейные критерии качества и поэтому ни при каких параметрах регуляторов не могут сочетать высокое быстродействие и точность.

Высокое качество управляемого процесса может быть обеспечено при использовании нелинейных свойств движения управляемой системы. В классе нелинейных критериев можно увеличивать быстродействие без потери точности, т. е. при использовании соответствующих приводов представляется возможным реализовать любые желаемые свойства движения. Это качество, присущее только нелинейным критериям, лежит в основе предлагаемых алгоритмов адаптивного управления.

Разница между экстремалами, соответствующими линейным и нелинейным критериям, характеризует потери качества управления в каждый

момент времени при использовании линейных критериев. Таким образом, целесообразность использования нелинейных критериев качества, порождающих экстремали типа рассмотренных, не вызывает сомнений. В предлагаемых адаптивных

алгоритмах управления могут использоваться линейные и нелинейные критерии первого и второго порядков. При этом достаточно ограничиться нелинейными критериями второго порядка.

УДК 621.941

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti6Al4V

Фельдштейн Е., Лексыцки К.

*Зеленогурский университет, Зелена Гура, Польша*

Материалы, используемые в медицине, включают нержавеющие стали, никелевые сплавы, титановые сплавы, сплавы на основе соединений кобальта и хрома и др. [1]. Наиболее часто используемые материалы – это нержавеющая сталь 316 L, титановый сплав Ti6Al4V и сплавы типа Co-Cr-Mo, Ni-Ti [2].

Исследуемый ниже титановый сплав имеет высокую прочность, низкий модуль упругости и низкую плотность. В контакте с организмом человека титан характеризуется превосходной коррозионной стойкостью, что делает его идеально пригодным для взаимодействия с людским организмом. Высокая механическая прочность титановых сплавов обеспечивает их высокую усталостную прочность и сопротивление механическим повреждениям. С другой стороны, эти сплавы характеризуются низкой обрабатываемостью, поскольку имеют низкую теплопроводность, низкий модуль упругости и высокую химическую активность. В ходе обработки в зоне резания возникают высокие температуры, происходит ускоренный износ инструмента, наблюдаются интенсивные вибрации, поэтому рекомендуется производить обработку с низкими скоростями резания

Форма стружки при обработке титановых сплавов тесно связана с режимами резания. Различия в формировании стружки наиболее заметно при высоких подачах и при высоких скоростях резания [3].

В [4] выполнен сравнительный анализ обработки титанового сплава Ti6Al4V без охлаждения и в условиях криогенического охлаждения. Установлено, что в последнем случае обеспечивается лучшая эффективность по сравнению с обработкой без охлаждения, поскольку уменьшается износ инструмента, улучшается качество обработанной поверхности, повышается способность стружколомания.

В [5] анализировалось формирование стружки при точении титанового сплава Ti6Al4V в условиях охлаждения под высоким давлением. При этом зафиксировано увеличение интенсивности образования сегментированной стружки и

толщины стружки по сравнению с традиционными условиями охлаждения.

Механика стружкообразования имеет важное влияние на процесс обработки, тогда как форма стружки является внешним отражением физических процессов имеющих место при резании. На основании характера стружки можно получить информацию об особенностях обрабатываемой детали, специфики режущего инструмента и процесса обработки [6].

Целью исследования был анализ формирования стружки в условиях финишной токарной обработки титанового сплава Ti6Al4V.

Исследования выполнялись на токарном станке с ЧПУ CTX 510 ecoline. Использовались резцы с оправкой CoroTurn SDJCR 2525M 11 с неперетачиваемыми пластинами Coro Turn DCMX 11 T3 04-WM 1115 с покрытием (Ti,Al)N+(Al,Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нанесенным способом PVD. Углы режущего лезвия: главный угол в плане 93°, главный передний угол 18°, главный задний угол 7°, радиус вершины 0,4 мм, ширина фаски на передней поверхности 0,1 мм.

Точение выполнялось при резании без охлаждения и при охлаждении эмульсией на основе концентрата Castrol Alusol SL 51 XBB с рабочей концентрацией 7 %.

Обрабатывался титановый сплав Ti6Al4V, имеющий твердость ~334 НВ и временное сопротивление ~620 МПа.

Диапазон режимов резания: скорости резания 40–120 м/мин и подачи 0,05–0,4 мм/об. Использовалась постоянная глубина резания, равная 0,5 мм, что является характерным при финишной обработке.

Коэффициент утолщения стружки  $K_b$  является важным показателем, который характеризует особенности формирования стружки. Коэффициент определяет скорость перемещения стружки вдоль передней поверхности и используется для расчетов ряда параметров зоны стружкообразования, сил резания, остаточных напряжений в поверхностном слое и т. д. Величину коэффициента утолщения стружки можно рассчитать по формуле:

$$K_h = \frac{h_{ch}}{h_D},$$

где:  $h_{ch}$  – толщина стружки,  $h_D$  – толщина срезаемого слоя.

Для расчетов использовалась средняя толщина стружки. Формула для случая резания главной режущей кромкой и вершиной резца приведена в [7].

Основным параметром стружкообразования, на основании которого можно оценить практически все основные показатели процесса резания – силы и температуру резания, мощность резания, величину и знак остаточных напряжений и т. д. является угол сдвига. Значения угла сдвига определяли по формуле [8]:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_h - \sin \gamma},$$

где  $\gamma$  – передний угол,  $K_h$  – коэффициент утолщения стружки.

Планирование экспериментов было основано на методе Parameter Space Investigation (PSI). Он позволяет планировать эксперименты в условиях минимизации числа измерений, которые размещаются в строго упорядоченных точках исследуемого пространства. Делается это таким образом, чтобы проекции этих точек на оси многофакторного пространства располагались бы на этих осях (в нашем случае  $X_1$ ,  $X_2$ ) на равных расстояниях друг от друга (рис. 1) [9].

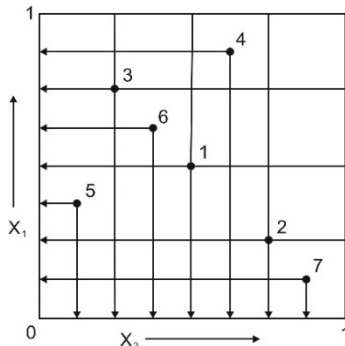


Рисунок 1 – Размещение точек измерения на осях  $X_1$  и  $X_2$  согласно методу PSI

Координаты точек измерения были рассчитаны на основе алгоритма, описанного в [8] и представленного в табл. 1, где  $X_{\min} = 0$  и  $X_{\max} = 1$ . Количество 7 экспериментальных точек на каждой оси измерений является достаточным для выполнения статистических расчетов.

| Точки измерений | Переменные |        |
|-----------------|------------|--------|
|                 | $X_1$      | $X_2$  |
| 1               | 0,5000     | 0,5000 |
| 2               | 0,2500     | 0,7500 |
| 3               | 0,7500     | 0,2500 |
| 4               | 0,8750     | 0,6250 |
| 5               | 0,3750     | 0,1250 |
| 6               | 0,6250     | 0,3750 |
| 7               | 0,1250     | 0,8750 |

Статистическая обработка результатов исследования выполнялась при использовании программы Statistica.

На рис. 2 показаны изменения формы стружки в зависимости от скорости резания, подачи и условий охлаждения. Как в условиях обработки всухую, так и при охлаждении эмульсией в точках пространства 1,3,4,5,6 образуются путанные стружки. При резании всухую в областях точек 2 и 7 образуются спиральные длинные и короткие стружки. При резании с эмульсией в тех же самых областях образуются только спиральные короткие стружки. Таким образом, граница раздела в формообразовании стружки находится в диапазоне скоростей резания 40 – 80 м/мин и подач 0,2 – 0,4 мм/об.

На рис. 3 показаны изменения коэффициента утолщения стружки в зависимости от режимов резания и условий охлаждения.

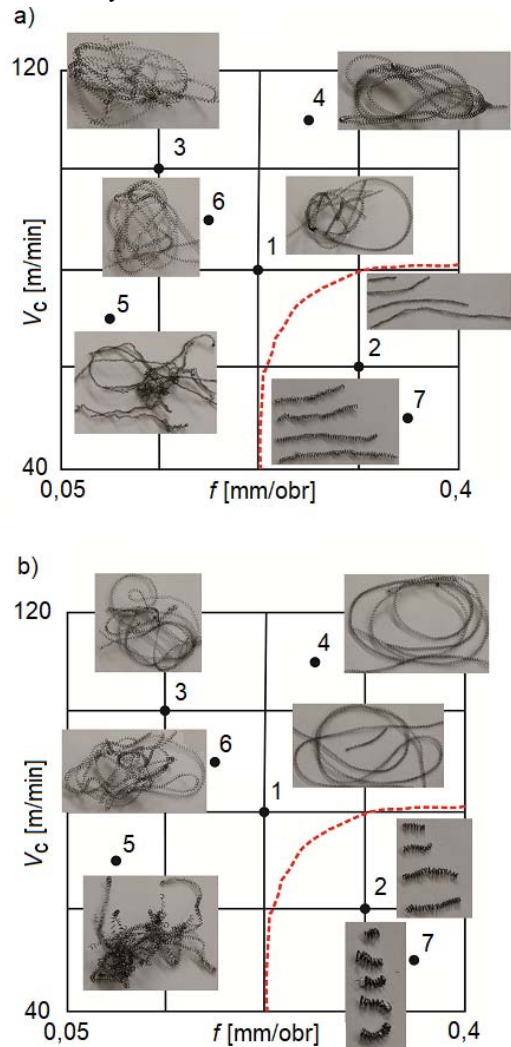


Рисунок 2 – Расположение координат 7 точек измерений и образованные в этих областях типы стружки: а) резание всухую, б) резание с эмульсией

Для расчета величины  $K_h$  найдены следующие уравнения регрессии:

– всухую  $K_h = 2,183 - 0,002V_c - 1,57f$ ;

– с эмульсией  $K_h = 2,223 - 0,002V_c - 1,996f$ .

Для расчета величины  $\Phi$  найдены следующие уравнения регрессии:

– всухую  $\Phi = 25,297 + 0,037V_c + 30,143f$ ;

– с эмульсией  $\Phi = 25,061 + 0,029V_c + 39,54f$ .

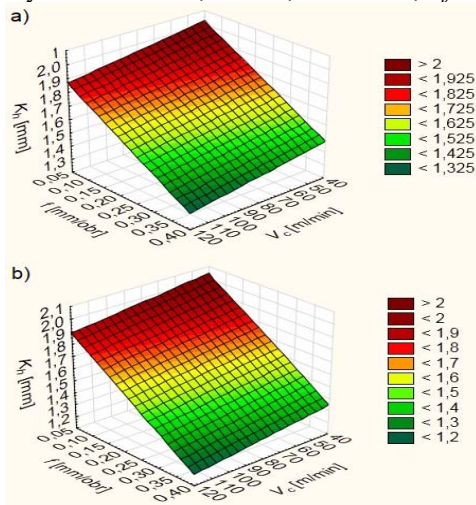


Рисунок 3 – Коэффициенты утолщения стружки в зависимости от скорости резания  $V_c$  и подачи  $f$ :

а) резание всухую, б) резание с эмульсией

На рис. 4 показаны изменения углов сдвига в зависимости от режимов резания и условий охлаждения.

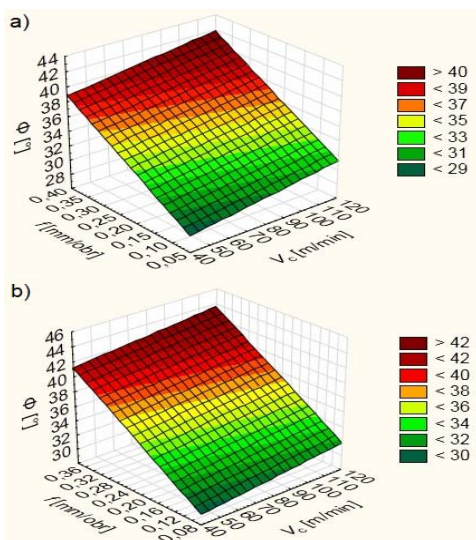


Рисунок 4 – Углы сдвига в зависимости от скорости резания  $V_c$  и подачи  $f$ : а) резание всухую, б) резание с эмульсией

На основании исследований можно утверждать, что интенсивности влияния скорости резания и подачи на коэффициент утолщения стружки и угол сдвига при резании всухую и с эмульсией близки.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при обработке всухую образуются путанные, спиральные короткие или спиральные длинные стружки, тогда как при резании с эмульсией – путанные или спиральные короткие,
- влияние условий охлаждения на форму стружки незначительно,
- коэффициенты утолщения стружки при резании всухую и с эмульсией близки,
- независимо от условий охлаждения благоприятная форма стружки наблюдается при низких скоростях резания и большими подачами,
- независимо от условий охлаждения влияние подачи на коэффициент утолщения стружки и угол сдвига достаточно велико, тогда как влияние скорости резания незначительно.

### Литература

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R*, Volume 87. – 2015. – pp. 1–57.
2. Ramsden J.J., Allen D.M., Stephenson D.J., Alcock J.R., Peggs G.N., Fuller G., Goch G. The Design and Manufacture of Biomedical Surfaces, *Annals of the CIRP*, Volume 56. – 2007. – pp. 687–711.
3. Batista M., Salguero J., Gomez-Parra A., Fernández-Vidal S., Marcos M. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process, 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), *Procedia CIRP*, Volume 8. – 2013. – pp. 534–539.
4. Bordin A., Sartori S., Bruschi S., Ghiotti A. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, Volume 142. – 2017. – pp. 4142–4151.
5. Palanisamy S., McDonald S.D., Dargusch M.S. Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 49. – 2009. – pp. 739–743.
6. Feldshtein E. Wybrane zagadnienia obróbki skrawaniem / E. Feldshtein. Zielona Góra: Oficyna wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2013. – 222 s.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
8. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.
9. Statnikov R.B., Matusov J.B. Multicriteria Analysis in Engineering / R.B. Statnikov, J.B. Matusov. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2002. – 250 p.

UDC 519.95

**MODELING OF MANUFACTURING PROCESSES USING A PETRI-NET**  
**Filonenko K.G., Vysloukh S.P.**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

The production system is a system of industrial production's organization, which consists of production means and objects, production processes and labor, the joint operation of which allows the products' production of consumer value.

Modern industrial and technical systems - automatic lines, robotic complexes, flexible production systems and other types of technical objects that operate in various fields of engineering, are complex in structure, layout and system organization of technological, auxiliary machines and other technical means, interconnected and function in a certain interaction, and the more coherent this interaction, the higher the productivity and other output technical and economic indicators of such systems [1].

Solving the issues of material's rational use and labor resources, increasing the efficiency of equipment requires the increase of scientific validity for production management's methods. Creating a competitive new technology involves the implementation of various diverse solutions. In these conditions, the transition to widespread use of economic and mathematical methods and models, which provide the choice of the best management option in terms of resource savings, increase the design efficiency and modern competitive products' production [2].

At present, great attention is paid to the improvement of equipment, but in essence, the autonomous performance of the equipment and its perfection does not take into account the size of the batches, the time spent on the transfer of parts between the machine tools. The most significant costs in the technological chain come from production. Static modeling does not provide a complete answer to many questions. The way out of this situation is the transition to complex (simulation) modeling of production processes, the model creation.

Such a model can be "played" in time for both a single test and multiply tests. Typically, simulation models are built to search for an optimal solution in terms of resource constraints, when other mathematical models are too complex. Modeling a production system is used when conducting experiments with a real system is impossible or inappropriate. The simulation of production processes connects all areas of products' production: the production process' development, the production process' modeling and technological preparation of production, as well as production management [3].

Traditional modeling systems are not able to take into account all the complex control influences and simulate their effects. Therefore, to implement a complex system of production process that can assess the influence of control factors in real time, it is

advisable to combine the effective means of system formal description and the possibility of such a modern tool as simulation modeling.

Simulation modeling, as an instrument for the experimental study of complex systems, covers the methodology for creating system models, algorithmic methods and means of program implementation of simulators, planning, organizing and executing on computer simulations experiments, machine data processing and results' analysis. In this case, the dynamic and stochastic characteristics of real processes are reflected in the model using specially designed procedures. It should be noted that the range of imitation application on a computer is extremely wide - from the concrete forms of enterprises' activity to imitating the whole country's economy. The object of modeling may be industrial, logistics, transport and other systems. Modeling of production systems allows: to identify and eliminate problems that are manifested at the start-up stage in advance and would require financial and temporal costs; reduce investment in production at the same productivity parameters; Conduct optimization of production and choose the most rational solution from a multitude of options [4].

Thus, the manufacturing process' development is preceded by the study of the product' design, which ends with the assembly of technological schemes of general and parts' assembly. The technological scheme of assembling contains information on the structure and order of attachment of the product elements, the assembly units' completeness and connections. When developing the route technological process of assembly on the basis of assembly scheme, the content of assembly operations is set in such a way that at every workplace, as possible, a homogeneous in character and technologically completed work is performed. In the future, the construction of the assembly scheme serves to identify and elaborate the development of operations, the definition of types of work, assemblies and other parameters that form the description of assembly operations.

Since the object of modeling in this case is not only the connections between the elements, but processes that occur at the same time, it is necessary to apply a model of a special kind: structural-functional, which simultaneously reflects the structure and functioning of the object being modeled. One of the best options for creating a mathematical model in this case is the graphs using. The most universal method of working with graphs can be considered the theory of networks Petri - an effective tool for modeling discrete processes. [5]. The main features of Petri's networks are the

ability to display parallelism, asynchrony, hierarchy of simulated objects in simpler ways than using other simulation tools [6].

Among the main advantages of Petri's networks, one can note that they allow with accurate accuracy to represent ramified, parallel, cyclic processes, possessing means of analysis, as well as simulation in real time. The simulation process can be divided into two stages: formation of structure and model parameters based on the properties of the original system (object of management); imitation experiments to achieve the required value of the quality system performance indicator.

The quality of the system is evaluated based on the numerical values of the chosen optimality criterion. The main means of optimization in network models are the rules of priority, which choose one of the given quantities of permitted operations by a predefined principle. It should be noted that with the use of priorities it is impossible to indicate that the optimal solution has been obtained from several possible ones. It is proved only that when applying the priority rules the value of the optimality criterion is better than without their use. Thus, Petri's networks formalize the concept of an abstract system - a dynamic structure of events and conditions. In the general theory of networks, the Petri apparatus is considered as one of the methods of systems' network simulation. Here are introduced more general network models. Their sole basis forms the notion of an inexplicable oriented network of conditions and events that describes only the static structure of the system. The most common in the range of dynamic network models is a conditionally affiliated system, which is a network, supplemented by the rules of changing conditions as a result of the events implementation. Petri's network can be considered a concretization of conditionally an eventful system [7].

Thus, using an imitation modeling, you can perform an unlimited number of experiments with different parameters. Simulation allows you to describe the structure of the system and its processes in its natural state, without resorting to the use of formulas and strict mathematical dependencies.

It is also worth noting that simulation allows taking into account the maximum possible number of environmental factors to support decision making and is one of the most powerful means of analysis. The necessity of its application in the domestic practice of managing production processes is due to the peculiarities of our economy, which is characterized

by dependence on non-economic factors and a high degree of uncertainty.

The simulation results can be supplemented by probabilistic and statistical analysis and, in general, provide the manager with the most complete information on the influence degree of key factors on the expected results and possible scenarios for the development of events.

As an example, by applying the theory of Petri's networks, an appropriate program was created in the Plant Simulation system, which allowed the creation of simulation models for loading the equipment of the automated section in the mechanical processing of the housing part.

The resulting simulation result showed that when using Petri Networks it is possible to reduce the idle time of the equipment and rationally distribute the load between the machine tools.

### Reference

1. Стерлигова, А.Н. Операционный (производственный) менеджмент // А.Н. Стерлигова, А. В. Фель. – М. : Инфра-М, 2015. –187 С.
2. Шаранов И.М., Лаврусъ О.Е. Имитационное моделирование управленческих процессов в производственных системах // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – Казань : 2011. – № 11. – С. 175–179.
3. Крышень Е.В., Петрова Е.С. Моделирование производственных процессов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара : 2012. – № 2. – С. 299–302.
4. Вислоух С.П., Філоненко К.Г. Імітаційне моделювання виробничих систем засобами Мережі Петрі // Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». Чернігів : ЧНТУ – 2017. – С. 91.
5. Мартынов В.Г., Масыгин В.Б. Применение сетей Петри при моделировании управления технологическими процессами сборочного производства// Омский научный вестник. – Омск : 2014. – № 1. – С. 134–137.
6. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 488 с.
7. Вислоух С.П., Філоненко К.Г. Мережі Петрі як засіб моделювання виробничих систем// Збірник статей «Погляд у майбутнє приладобудування». – К. : НТУУ «КПІ» 2018. – С 251–255.

**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТРОЙНОГО СПЛАВА  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$   
Шепелевич В.Г., Русак Г.А., Росихин М.И.**

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

В последнее десятилетие активно происходит переход к легкоплавким припоям, не содержащим опасные компоненты (свинец, ртуть, кадмий). Основными причинами являются как экологическая безопасность, так и более высокие эксплуатационные параметры таких припоев [1; 2]. В различных отраслях промышленности (электротехнике, электронике, энергетике, машиностроении и др.) перспективное применение имеют сплавы тройной системы Bi – Sn – In. Из-за высокой стоимости компонентов сплавов рассматриваемой системы целесообразно изготавливать используя энерго- и ресурсосберегающие технологии для понижения стоимости конечного продукта. К таким технологиям относится высокоскоростное затвердевание, при котором скорость охлаждения жидкой фазы достигает  $10^5$  К/с и выше. Структура сплава, получаемого при сверхвысоких скоростях охлаждения жидкости, существенно отличается от структуры массивных образцов, получаемых традиционными технологиями [3, 4]. Быстрозатвердевшие сплавы имеют дисперсную структуру, могут содержать метастабильные фазы, находятся в термодинамическом неустойчивом состоянии. В связи с этим цель настоящей работы – установление влияния сверхвысокой скорости охлаждения жидкой фазы сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$  на его фазовый состав, распределение компонентов, зерненую структуру и микротвердость.

Изготовление сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$  осуществлялось сплавлением компонентов, чистота которых не хуже 99,99 %, в кварцевой ампуле. Затем капля расплава массой  $\approx 0,15$  г инжигировалась на полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра, растекалась тонким слоем и затвердевала в виде фольги. Длина фольги достигала в длину 15 см, в ширину – до 10 мм. При исследовании использовались фольги толщиной 30–80 мкм. Скорость охлаждения составляла в этом случае не менее  $10^5$  К/с.

Микроструктура фольг и распределение компонентов исследовались с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP, оснащенного рентгеновским микроанализатором Aztec Energy Advanced X-Max 80. Фазовый состав фольг определялся рентгеноструктурным анализом на дифрактометре Rigaku Ultima 4. Параметры микроструктуры определены методом случайных секущих [5] с погрешностью 10 %.

Поверхность *A* быстрозатвердевшей фольги, контактирующая с медным кристаллизатором, имела блестящий вид. Противоположная поверхность *B* фольги имела матовый вид, на ней образовались впадины и выступы

Химический состав фольги определялся с помощью рентгеноспектрального микроанализа на обеих сторонах фольги (таблица 1). Различие между концентрациями компонентов не превышает 1 %, т.е. при перемещении межфазной границы «жидкость-кристалл» от поверхности *A* к поверхности *B* перераспределение компонентов не наблюдается.

Таблица 1 – Химический состав быстрозатвердевшей фольги

| Компонент, | Концентрация компонентов, ат. % |                      |
|------------|---------------------------------|----------------------|
|            | Поверхность <i>A</i>            | Поверхность <i>B</i> |
| In         | 41,4                            | 40,6                 |
| Sn         | 26,8                            | 27,3                 |
| Bi         | 31,8                            | 32,1                 |

Рентгеноструктурный анализ фольги выявил дифракционные линии  $\epsilon$ -фазы (BiIn) ( 101, 111, 200, 002, 102, 211 и др.) и  $\gamma$ -фазы (Sn<sub>4</sub>In) ( 0001, 10 $\bar{1}$ 1, 10 $\bar{1}$ 0, 11 $\bar{2}$ 0, 0002, 11 $\bar{2}$ 1, 20 $\bar{2}$ 0 и др.).

Изображение поперечного сечения фольги, полученное с помощью растрового электронного микроскопа, представлено на рис. 1. Наблюдаются светлые и темные участки.

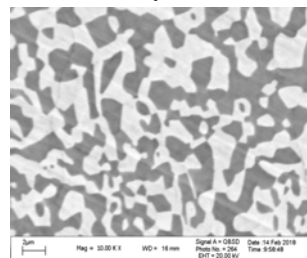


Рисунок 1 – Поперечное сечение фольги сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$  через 24 ч выдержки при комнатной температуре

Распределение компонентов быстрозатвердевшей фольги сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$  вдоль линии сканирования электронного луча по ее поверхности представлено на рис. 2.

В светлых участках отношение атомных концентраций висмута и индия составляет  $\approx 1$ , что соответствует образованию  $\epsilon$ -фазы (BiIn). Концентрация олова в таких участках составляет 2 ... 4 ат.%. В темных участках отношение атомных концентраций олова, индия и висмута равно 58, 31 и 11 соответственно.  $\gamma$ -фаза (Sn<sub>4</sub>In) имеет простую гексагональную решетку и существует в широком концентрационном интервале, что способствует образованию на ее основе твердых растворов с другими компонентами [6]. В связи с этим можно считать, что темные участки соответствуют  $\gamma$ -фазе.



Используя методы стереометрической металлографии, определены объемная доля  $\epsilon$ -фазы  $V_\epsilon = 0,58$  и  $\gamma$ -фазы  $V_\gamma = 0,42$ . Исследовано влияние выдержки быстрозатвердевшей фольги сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$  при комнатной температуре на параметры ее микроструктуры на поверхности  $A$ . С увеличением времени старения происходит монотонное изменение средней хорды случайной секущей  $d$  и удельной поверхности  $S$  межфазной границы (Таблица 2).

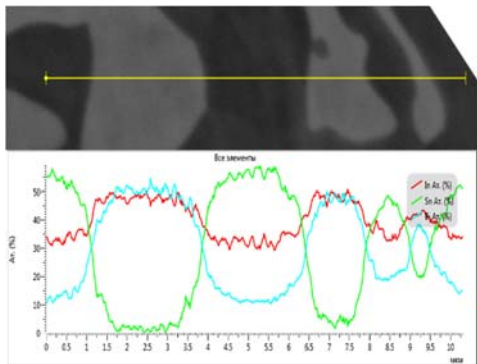


Рисунок 2 – Распределение компонентов вдоль линии сканирования электронного луча по поверхности фольги

Таблица 2. Параметры микроструктуры фольг на их поверхности от времени выдержки после изготовления

| Время выдержки, ч | Объемная доля $\epsilon$ -фазы | Средняя длина хорд на $\epsilon$ -фазе, мкм | Удельная поверхность межфазной границы, $\text{мкм}^{-1}$ |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1,3               | 0,59                           | 0,8                                         | 2,8                                                       |
| 3,0               | 0,57                           | 1,0                                         | 2,5                                                       |
| 24                | 0,58                           | 1,7                                         | 1,5                                                       |
| 70                | 0,57                           | 2,0                                         | 0,9                                                       |

Выдержка фольги в течение 70 ч вызывает увеличение средней хорды до  $d = 1,9$  мкм и уменьшение удельной поверхности межфазной границы до  $S = 0,9$   $\text{мкм}^{-1}$ . Такое изменение  $d$  и  $S$  фольги вызвано тем, что комнатная температура является высокой для исследуемого сплава. Отношение комнатной температуры к температуре ликвидуса исследуемого сплава в абсолютной шкале достигает 0,8. В сплаве активно происходят диффузионные процессы, способствующие

миграции межфазных границ, а также улучшению их структуры [8].

#### Заключение

Фольги тройного сплава  $\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}\text{Bi}_{32}$ , полученные высокоскоростным затвердеванием, имеют двухфазную структуру: состоят из  $\epsilon$ - и  $\gamma$ -фаз.

Выдержка фольг при комнатной температуре вызывает монотонное увеличение средней хорды на сечениях выделений и уменьшение удельной поверхности межфазной границы установленных фаз.

Формирование однородной дисперсной структуры способствует улучшению технологических характеристик данного спая при использовании его в качестве припоя [7].

#### Литература

1. Kamal M., Gouda E.S. Effect of Rapid Solidification on Structure and Properties of Some Lead-Free Solder Alloys // Materials and Manufacturing Processes, 2006. Vol. 21. P. 736–740.
2. Yoon S.W., Rho B.-S., Lee H. M., Kim C.-U., Lee B.-J. Investigation of the Phase Equilibria in the Sn-Bi-InAlloy System // Metall. Mater. Trans. A. 1999. Vol. 30A. P. 1503–1515.
3. Васильев В.А., Митин Б.С., Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технологии и материалы) / Под ред. Б.С. Митина. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 1998. – 400 с.
4. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.
5. Салтыков С.А. Стереология в металлведении. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
6. Смитлз К. Дж. Металлы. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.
7. Пашков И.Н., Пикунов М.В., Таволжанский С.А., Пашков А.И. Разработка процессов получения и применения сплавов припоев в дисперсионном состоянии с микрокристаллической или аморфной структурой // Металлург, 2010. – № 6. – С. 43–45.
8. Шепелевич В.Г., Ван Цзинцзе, Щербаченко Л.П. Фазовый состав, микроструктура и микротвердость быстрозатвердевших сплавов системы индий-олово // Новости науки и технологий, 2017. – № 1(40). – С. 48–53.

УДК 666.193

### ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНИ МЕТОДАМИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО МИКРОАНАЛИЗА

Анисович А.Г.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Журавлева В.И.<sup>2</sup>, Щербаченко Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

#### Введение

Базальтовые волокна значительно отличаются от стекловолокна и силикатного волокна повышенной прочностью и возможностью примене-

ния в широком диапазоне положительных и отрицательных температур. Удельная прочность базальтового волокна в 2,5 раза превышает прочность легированных сталей и в 1,5 раза

прочность стекловолокна, оно не поддается коррозии и является более стойким к щелочам по сравнению со стекловолном, и по своим показателям занимает промежуточную позицию между углеродными волокнами и стекловолном.

Универсальность базальтового волокна в области применения обусловлена высокой температурой плавления (1400 °С), низким влагопоглощением (материал считается гидрофобным), низкой теплопроводностью, экологической чистотой. В промышленности данное волокно используется в рефрижераторах, печах, буровых вышках турбинах, в строительных работах для усиления дорожного асфальта, обеспечивает защиту металлоконструкций от высоких температур и т. д.

Теплоизоляционные изделия из базальтовых волокон могут применяться при температурах до 700°С. Кроме того, существует ряд составов на основе базальтовых пород, обладающих более высокой термостойкостью до 800°С. Базальтовые волокна применяются для изготовления фильтров для очистки отходящих газов от пылевых частиц на обогатительных и металлургических комбинатах, химических заводах, предприятиях промышленности строительных материалов и энергетики. На основе базальтовых волокон эксплуатируются фильтры для очистки воздуха с диапазоном рабочих температур 300–650°С.

Высокие электроизоляционные характеристики, радиопрозрачность для электромагнитного излучения базальтовой ткани используется для производства электроизоляционных материалов как высоковольтной так и низковольтной аппаратуры, при строительстве высоковольтных линий электропередач, для производства обтекателей и конструкций антенн, локаторов и другого радиотехнического оборудования.

Сырьем для производства волокна является базальт – природный материал магматического происхождения, имеющий высокую природную химическую и термическую стойкость. Содержание базальта в земной коре выше 30 %, что обуславливает его ценовую доступность.

Таким образом, исследование базальтовых тканей и волокон представляет не только научный, но и практический интерес.

Целью данной работы является исследование морфологии базальтовой ткани. Исследовалась базальтовая ткань, выпускаемая открытым акционерным обществом «Полоцк-Стекловолокно».

#### Методы проведения исследований

Исследования морфологии образцов проводились с помощью металлографического микроскопа МИ-1. Данный микроскоп использовался в режиме светлого поля в отраженном свете

Элементный анализ проводился с помощью системы энергодисперсионного (EDS) микроанализа, установленной на сканирующем электронном микроскопе SEM 515. Этот комплекс, в со-

став которого входят Si(Li) детектор со сверхультратонким окном, охлаждаемый жидким азотом, компьютер и пакет программного обеспечения Genesis SEM Quant ZAF software.

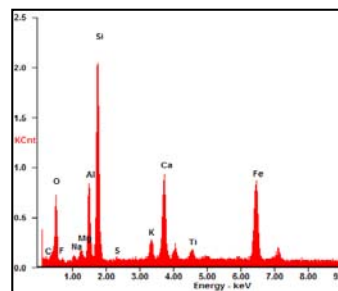
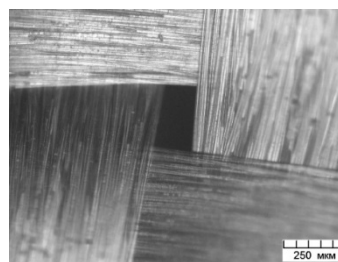
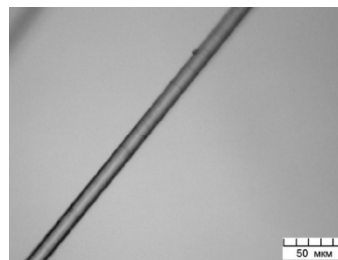


Рисунок 1 – Элементный состав базальтового волокна

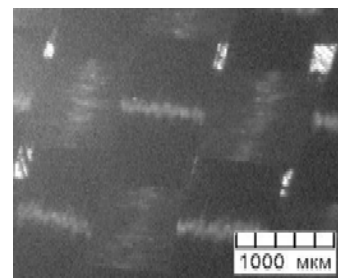


a

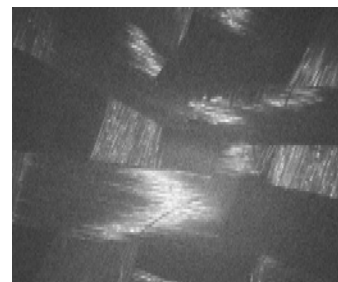


б

Рисунок 2 – Базальтовая ткань (а) и отдельное волокно (б)



a



б

Рисунок 3 – Макроструктура исходной (а) и облученной лазером при энергии 60 Дж (б) базальтовой ткани

Измерения проводились при различных значениях ускоряющего напряжения: от минимального порога чувствительности системы микроанализа (6,4 кВ) до максимального значения ускоряющего напряжения, которое составляет 30 кВ.

#### Результаты исследований

На рисунке 1 представлен элементный состав базальтовой ткани. Как видно из рисунка элементный состав базальта весьма разнообразен. Фазовый состав: кремнезем, окислы титана, железа, алюминия, марганца, магния, кальция, калия, натрия.

На рисунке 2 показаны результаты исследования базальтовой ткани полотняного плетения помощью металлографического микроскопа. Как видно из рисунка, диаметр волокон составляет порядка 10 мкм.

Для исследования изменения макроструктуры базальтовой ткани при внешних воздействиях было

проведено облучение лазером при вложенной энергии 60 Дж и времени воздействия 1 мин. Результаты исследований представлены на рисунке 3.

Таким образом, при данной энергии воздействия наблюдается незначительное повреждение базальтовой ткани, возникает обрыв пакетов волокна и смещение прилегающих участков ткани. Элементный состав при этом не изменяется.

#### Выводы

В результате проведенных комплексных исследований определен элементный состав и макроструктура базальтовой ткани полотняного плетения.

#### Литература

Демешкин, А.И., Шваб, А.А.. Исследование механических свойств непрерывного базальтового волокна применительно к производству композитных материалов, Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 3(24) (2011), С. 185–188.

УДК 621.7.09

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ДО И ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ Юрасова К.В.<sup>1</sup>, Биткаша В.С.<sup>1</sup>, Хомич Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Унитарное предприятие «Полимаг», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

#### Введение

Проблема формирования поверхностей с рельефом наноуровня и приповерхностных слоев с минимальным количеством дефектов структуры чрезвычайно актуальна для ответственных изделий оптической и лазерной техники. [1]

Развитие традиционных методов финишной обработки деталей машин и приборов часто не отвечает современным требованиям. Выход на более высокий уровень качества возможен путем создания прогрессивных технологий, основанных на использовании нетривиальных физико-химических источников энергии. Одним из таких источников является энергия магнитного поля, все более широко применяемая во многих областях техники – от атомных реакторов до медицинских приборов. [2].

Сущность магнитно-абразивной обработки (МАО) основана на способности ферро магнитной массы, размещенной в магнитном поле, без каких-либо механизмов-преобразователей оказывать абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность заготовок.

#### Методика исследования образцов

Образец из оптического стекла Ø40×10 мм выбран из номенклатуры изделий ОАО «Пеленг» (г. Минск) для проведения исследований нанорельефа поверхности до и после магнитно – абразивной обработки. Образец не подвергался дополнительной очистке исследуемой поверхности

перед проведением исследований на сканирующем зондовом микроскопе «Solver Pro M».

Исследование на сканирующем зондовом микроскопе «Solver Pro M» осуществлялось в контактном режиме в трех произвольно выбранных точках образца: центр, середина радиуса и 6–8 мм от края.

Для каждой выбранной точки сканирование проводилось последовательно на областях 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм без перемещения образца.

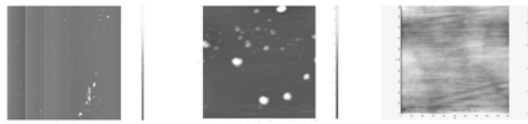
Измерение и анализ характеристик нано рельефа поверхности образца осуществлялись с использованием специализированного программного обеспечения «Nova», сканирующего зондового микроскопа «Solver Pro M». С целью типизации исследуемых поверхностей перед проведением анализа топографии поверхности образца с использованием программного обеспечения «Nova» последовательно проводилось вычитание плоскости, поверхности второго порядка и поверхности третьего порядка. В результате анализа были определены следующие характеристики топографии поверхности образца: среднеквадратичное отклонение (RMS), параметр шероховатости (Sa).

На рисунках 1-3 показаны изображения поверхности (топография) до МАО на областях 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм в точках образца: 6–8 мм от края, середина радиуса, центр. В таблице 1 представлены результаты определе-

ния характеристик топографии нанорельефа поверхности образца: среднеквадратичное отклонение (RMS), значение шероховатости (Sa), полученные в результате анализа изображений, представленных на рисунках 1-3.

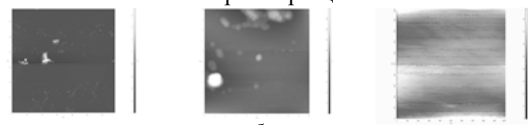
Таблица 1 – Характеристики поверхности образца до MAO

| Характеристика | Положение точки анализа и размер области сканирования |        |         |               |         |         |            |         |         |
|----------------|-------------------------------------------------------|--------|---------|---------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|                | Край, мкм                                             |        |         | Середина, мкм |         |         | Центр, мкм |         |         |
|                | 68                                                    | 10     | 1       | 68            | 10      | 1       | 68         | 10      | 1       |
| RMS, нм        | 22,5093                                               | 10,109 | 1,53676 | 83,5671       | 43,0649 | 6,38072 | 22,6108    | 17,9699 | 2,34939 |
| Sa, нм         | 14,4926                                               | 4,7277 | 1,05571 | 33,4703       | 23,5888 | 4,94509 | 14,0058    | 9,07774 | 1,65256 |



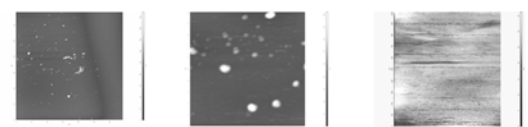
а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

Рисунок 1 – Топография поверхности в точке 6–8 мм от края образца



а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

Рисунок 2 – Топография поверхности в точке на середине радиуса образца



а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

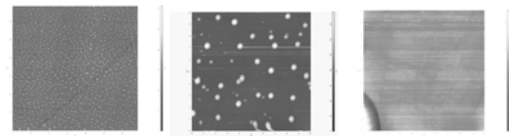
Рисунок 3 – Топография поверхности в точке центра образца

**Результаты исследования нано рельефа поверхности образца**

На рисунках 4-6 показаны изображения поверхности на областях 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм в точках образца: 6–8 мм от края, середина радиуса, центр после проведения магнитно-абразивной обработки. В таблице 2 представлены результаты определения характеристик топографии поверхности образца после MAO, полученные в результате анализа изображений, представленных на рисунках 4-6.

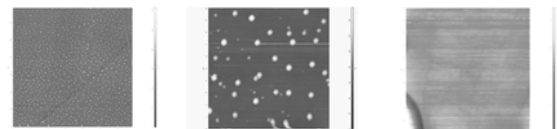
Таблица 2 – Характеристики поверхности образца после MAO

| Характеристика | Положение точки анализа и размер области сканирования |         |         |               |         |         |            |         |         |
|----------------|-------------------------------------------------------|---------|---------|---------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|                | Край, мкм                                             |         |         | Середина, мкм |         |         | Центр, мкм |         |         |
|                | 68                                                    | 10      | 1       | 68            | 10      | 1       | 68         | 10      | 1       |
| RMS, нм        | 6,58871                                               | 2,48859 | 1,45161 | 8,67259       | 10,1931 | 1,26953 | 8,55671    | 3,69699 | 2,34939 |
| Sa, нм         | 4,45213                                               | 1,6847  | 0,84917 | 4,77394       | 5,7444  | 0,70239 | 5,0035     | 2,19285 | 1,65265 |



а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

Рисунок 4 – Топография поверхности в точке 6-8 мм от края образца



а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

Рисунок 5 – Топография поверхности в точке на середине радиуса образца



а, б, в – Области 68×68 мкм, 10×10 мкм, 1×1 мкм соответственно

Рисунок 6 – Топография поверхности в точке центра образца

**Заключение**

В результате магнитно-абразивной обработки заметно улучшилось качество поверхности образцов из оптического стекла, а в приповерхностном слое практически отсутствуют дефекты. С помощью магнитно-абразивной обработки можно сформировать поверхность наноуровня с параметром Ra < 6 нм.

**Литература**

1. Зубаков, В.Г., Семибратов, Н.Н., Штандель, С.К. Технология оптических деталей. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
2. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 217 с. : ил.

**Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 621.792.4

**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ШАГА ЛИНЗОВОГО РАСТРА  
В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОГРАФИИ**

Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Линзовый растр в системе записи и воспроизведения изображений методом интегральной фотографии как дискретный элемент является потенциальным источником искажений. Причиной этих искажений является не обоснованное значение шага линзового растра. Упомянутые искажения могут проявляться как:

- а) ложная информация;
- б) прерывистость изображения по глубине;
- в) прерывистость изображения в поперечном направлении;
- г) заметность линзовой структуры растра.

В [1-4] приводятся результаты исследований допустимых значений шага линзового растра, при которых отсутствуют первые три разновидности искажений. С учетом влияния изменения масштаба от видеосъемки к проекции и выбора наиболее критичного к искажениям элемента линзового растра эти условия были приведены к следующему виду:

$$t_{oc1} \geq \frac{2x_A * m}{z_A}, \quad (1)$$

$$t_{oc2} \geq \frac{-x_A * m}{z_A * (1 + \frac{z_A * M}{dZ})}, \quad (2)$$

$$t_{oc3} \geq \frac{dX * m}{-MZ_B}, \quad (3)$$

где  $t_{oc1}$ ,  $t_{oc2}$ ,  $t_{oc3}$  – значения шага линзового растра, найденные соответственно из условий отсутствия ложной информации, прерывистости изображения по глубине, прерывистости изображения в поперечном направлении;  $X_A$  и  $Z_A$  – координаты записываемой точки  $A$  в направлениях, соответственно параллельном и перпендикулярном плоскости растра;  $m$  – расстояние от задней главной плоскости линзы растра до цифровой матрицы;  $dZ$  – модуль линейного порога различения зрительного анализатора по глубине, вычисляемый по формуле:

$$dZ = \frac{d\alpha * Z_{гл}^2}{B_{гл}}; \quad (4)$$

где  $Z_{гл}$  – расстояние между зрителем и рассматриваемой точкой,

$B_{гл}$  – глазной базис,  $d\alpha$  – предельно малый угол диспаратности, выраженный в радианах;  $dX$  – линейный предел различения зрительного анализатора в поперечном направлении, рассчитываемый по формуле:

$$dX = Z_{гл} * \gamma, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – предельное угловое разрешение зрительного анализатора в поперечном направлении,

выраженное в радианах;  $M$  – масштаб увеличения от видеосъемки к проекции.

Ограничение шага линзового растра для предотвращения четвертого вида искажений (заметность линзовой структуры растра) имеет вид:

$$t_{oc4} \leq \gamma \left( \frac{Z_{гл}}{M} + |Z_A| \right) \quad (6)$$

Анализ неравенств (1, 2, 3) и (6) показывает, что в первые трех из них шаг линзового растра ограничивается снизу. Единственным ограничением шага сверху является неравенство (6).

Их условия (1) следует, что нижний предел шага линзового растра видеосъемочной матрицы, обусловленный отсутствием ограничения поля зрения линзовых элементов, определяются координатами записываемой точки изображения и расстоянием между линзой и матрицей. Значения этого (далее – первого) нижнего предела прямо пропорциональны поперечной координате записываемой точки и расстоянию между линзовым растром и цифровой матрицей, обратно пропорциональны продольной координате записываемой точки.

Так как координата  $Z_A$  записываемой точки  $A$  будет всегда отрицательной вследствие направленности оси  $Z$  в сторону цифровой матрицы, то знак порогового значения шага будет зависеть от знака поперечной координаты  $X_A$  точки  $A$ . Отрицательное значение порога (для положительных значений  $X_A$ , то есть расположения точки  $A$  выше оси симметрии растра) означает, что для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра, ограничение шага по предотвращению появления ложной информации отсутствует. Соответственно это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра.

Из неравенства (2) очевидно, что нижний предел шага линзового растра при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения по глубине, зависит от координат записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции. Значения данного (далее – второго) нижнего предела прямо пропорциональны поперечной координате записываемой точки и расстоянию между линзовым растром и цифровой матрицей. Так как при различных сочетаниях значений параметров в правой части неравенства (2) второй нижний предел может принимать как положительные,

так и отрицательные значения, значит, существуют области параметров из правой части неравенства (2), при которых ограничение по второму пределу отсутствует.

Из неравенства (3) следует, что нижний предел шага линзового раstra при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения в поперечном направлении, зависит от продольной координаты  $Z_B$  записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции и не зависит от поперечной координаты точки  $X_B$ .

Значения вышеупомянутого (далее – третьего) нижнего предела прямо пропорциональны поперечной координате записываемой точки и расстоянию между линзовым растром и цифровой матрицей, обратно пропорциональны продольной координате записываемой точки и масштабу увеличения при проекции.

Так как координата  $Z_A$  всегда отрицательна, по аналогии с первым ограничением и с учетом отрицательного знака в правой части неравенства (3) для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового раstra, ограничение шага по предотвращению ложной информации отсутствует. Соответственно это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных выше оси симметрии линзового раstra.

Очевидно, что верхний (четвертый) предел шага линзового раstra при видеосъемке, определяемый неравенством (6), зависит от расстояния между зрителем и воспроизводимой точкой, от продольной координаты этой точки при видеосъемке и от масштаба увеличения при проекции и не зависит от поперечной координаты точки.

Значения верхнего предела связаны линейной зависимостью с продольной координатой записываемой точки и расстоянием между зрителем и воспроизводимой точкой, уменьшается по гиперболе с ростом масштаба увеличения при проекции. Так как правая часть неравенства (6) всегда положительна, ограничение по верхнему порогу в соответствии с неравенством (6) надо принимать во внимание при любых значениях координат записываемой точки.

Из анализа совокупности неравенств (1-3, 6) следует что для точек, лежащих выше оси симметрии матрицы, при выборе диапазона допустимых значений шага линзового раstra необходимо решать систему неравенств (2, 3, 6), а для точек, лежащих ниже оси симметрии матрицы, – систему (1, 2, 4).

На основании разработанной методики были построены графики зависимости четырех вышеперечисленных значений порогов от координаты  $Z_A$ ,

перпендикулярной плоскости матрицы при следующих фиксированных значениях параметров:  $X_A = 100$  мм,  $m = 20$  мм,  $M = 10$ ,  $Z_{гл} = 2000$  мм. Расчет показал, что в данном случае диапазон допустимых значений шага раstra ограничивается неравенствами (3) снизу (сплошная линия на рис. 1) и (6) сверху (пунктирная), т. е. условиями 3 и 4.

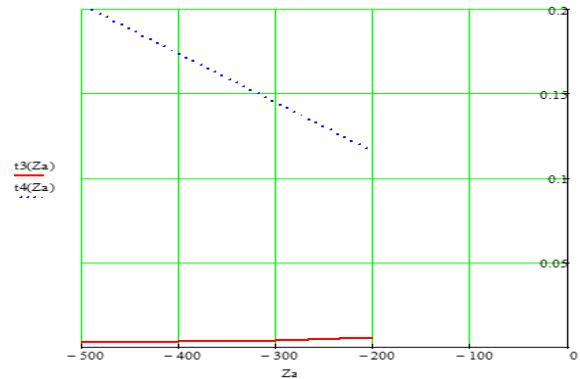


Рисунок 1 – Графики зависимости пороговых значений шага линзового раstra от координаты  $Z$  при фиксированных значениях других параметров

#### Литература

1. Зайцева, Е.Г. Определение параметров систем записи и воспроизведения объемного изображения / Е.Г. Зайцева, А.А. Кислюк, Т.О. Ларионова // 10-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2017». – Минск, 1–2 ноября 2017 г. – БНТУ. – 2017. – С. 368–370.
2. Ларионова, Т.О. Предотвращение искажений при отсутствии ограничения поля зрения линзовых элементов / Т.О. Ларионова, Е.Г. Зайцева // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-ой Международной научно-технической конференции. Минск, БНТУ, 18–20 апреля 2018 г. – Минск : БНТУ. – 2018. – С. 134.
3. Ларионова Т.О. Условие непрерывности объемного изображения по глубине / Т.О. Ларионова, Е.Г. Зайцева // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-ой Международной научно-технической конференции. Минск, БНТУ, 18–20 апреля 2018 г. – Минск : БНТУ. – 2018. – С. 135.
4. Ларионова Т.О. Условие отсутствия прерывистости при изменении ракурса наблюдения объемного изображения / Т.О. Ларионова, Е.Г. Зайцева // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-ой Международной научно-технической конференции. Минск, БНТУ, 18–20 апреля 2018 г. – Минск : БНТУ. – 2018. – С. 136.

УДК 535.339; 621.317

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На протяжении многих лет ученых привлекает идея создания светоизлучающего диода совместимого с технологией производства кремниевых интегральных схем. Наиболее перспективными материалами активных сред разрабатываемых светоизлучающих структур на основе кремния являются оксид ( $\text{SiO}_x$ ), нитрид ( $\text{SiN}_x$ ) и оксинитрид ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) кремния. Спектроскопия электролюминесценции (ЭЛ) является ключевой методикой, позволяющей определить пригодность разрабатываемых структур для создания на их основе приборов кремниевой оптоэлектроники. Метод ЭЛ обладает высокой чувствительностью к наличию дефектов и примесей и позволяет получать не только информацию о составе, строении и структурных особенностях диэлектрических слоев, но и оценивать влияние дефектов и примесей на процессы переноса носителей заряда под действием электрического поля [1].

Для исследования ЭЛ, электрофизических параметров и фотопроводимости диэлектрических слоев, сформированных на кремниевых подложках, необходимо создавать диодные структуры, обеспечивающие максимальный квантовый выход. Наиболее простым и распространенным методом создания тестовых структур является формирование прозрачных проводящих контактов на поверхности диэлектрических слоев. Электрофизические и свето-излучающие свойства создаваемых тестовых структур во многом определяются их топологией, материалом и типоразмерами контактов. Наиболее распространенными материалами для формирования прозрачных и полупрозрачных электродов являются легированный поликристаллический кремний, оксид индия-олова, тонкие пленки металлов (Al, Au), жидкий электролит (водный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ) [1]. Применение электролита в качестве прозрачного контакта к диэлектрическому слою имеет ряд особенностей, позволяющих значительно расширить возможности метода ЭЛ, повысить его точность и информативность. Среди основных преимуществ системы электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) при исследовании ЭЛ структур  $\text{SiN}_x/\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_x/\text{Si}$  и  $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{Si}$  можно выделить следующие:

- возможность создания в диэлектрическом слое более сильных электрических полей по сравнению с системой МДП;
- возможность измерения спектрального распределения ЭЛ при послойном стравливании

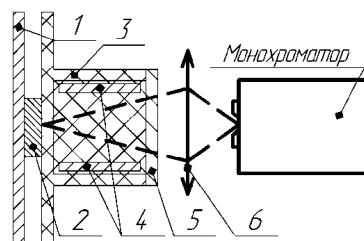
диэлектрического слоя, что позволяет получить распределение излучающих центров по глубине диэлектрического слоя;

- высокая спектральная прозрачность электролита;
- простота нанесения и удаления полевого электрода.

Для реализации метода ЭЛ в системе ЭДП на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета создана установка, позволяющая регистрировать спектры электролюминесценции в диапазоне 250–1000 нм.

В состав установки входит: электрохимическая ячейка, источник питания Б5-50, стабилизаторы тока и напряжения, многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) В-380, монохроматор МДР-23, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100, охлаждаемая кремниевая ПЗС линейка, регистрирующая система «Spectralink» с компьютером.

На рисунке 1 представлена оптическая схема разработанной экспериментальной установки.



1 – анод, 2 – образец, 3 – электрохимическая ячейка, 4 – катоды, 5 – кварцевое стекло, 6 – кварцевая линза

Рисунок 1 – Оптическая схема экспериментальной установки для регистрации спектров электролюминесценции в системе ЭДП, вид сверху

Электрохимическая ячейка представляет собой ёмкость, изготовленную из PLA пластика методом трехмерной печати. Внутренний объем ячейки – 4 см<sup>3</sup>. Катоды изготовлены из химически инертного сплава. Исследуемый образец помещается между анодом и отверстием в электрохимической ячейке, которое обеспечивает электрический контакт образца с электролитом и служит для вывода излучения.

На рисунке 2 представлена структурная электрическая схема установки для возбуждения ЭЛ в системе ЭДП.

В представленной установке реализована возможность проведения измерений при посто-

янном токе в диапазоне 1 мкА..20 мА с шагом 1 мкА или постоянном напряжении в диапазоне 1..300 В с шагом 0,5 В на исследуемом образце. Входящий в состав установки многоканальный АЦП позволяет осуществлять контроль напряжения и тока, а так же записывать временные зависимости тока, напряжения и заряда протекающего через образец в процессе регистрации спектра. Сопоставление полученных временных зависимостей напряжения и тока со спектрами ЭЛ позволяет определить влияние степени заполнения электронных и дырочных ловушек на спектральный состав и интенсивность полос ЭЛ, определить наиболее эффективный режим возбуждения ЭЛ, оценить величину напряжения пробоя исследуемого образца.

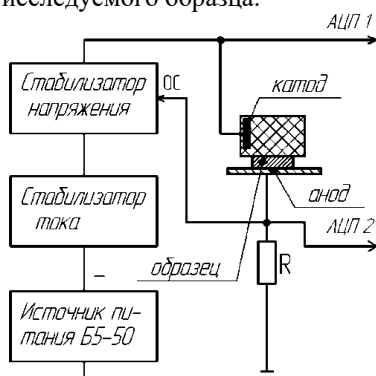


Рисунок 2 – Структурная электрическая схема установки для возбуждения электролюминесценции в системе ЭДП

Установка была апробирована на структурах  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ . На рисунке 3 представлены спектры ЭЛ образцов  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_{0,9}/\text{SiO}_2$ , зарегистрированные при различных плотностях протекающего тока. Диэлектрические слои оксида и нитрида кремния сформированы методом химического осаждения из газовой фазы на кремниевой пластине р-типа. Общая толщина диэлектрических слоев составляет 140 нм. Спектры ЭЛ зарегистрированы при анодной поляризации кремниевой подложки.

Спектры ЭЛ характеризуется полосами с энергиями в красной (1,9 эВ), зеленой (2,3 эВ) и синей (2,7 эВ) области, причем последняя по-

лоса имеет наибольшую интенсивность. Полоса в красной области спектра ЭЛ связана с наличием в слоях  $\text{SiO}_2$  силанольных групп ( $\text{Si-OH}$ ). ЭЛ в зеленой области объясняется внутрицентровыми переходами в атомах трехкоординированного кремния в слоях  $\text{SiO}_2$ . Интенсивная полоса ЭЛ с максимумом при 2,7 эВ характерна для излучательной релаксации силиленовых центров [2]. Наличие этих центров присуще слоям оксинитрида кремния, что позволило сделать заключение о формировании таких слоев на границах оксида и нитрида кремния. Установлено, что интенсивность свечения этой полосы обладает наибольшей устойчивостью к воздействию сильных электрических полей после протекания через образец заряда 1-3 Кл/см<sup>2</sup>.

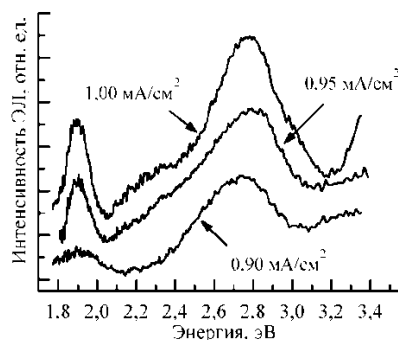


Рисунок 3 – Спектры электролюминесценции образца  $\text{p-Si}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_{0,9}/\text{SiO}_2$

Таким образом, реализованный метод электролюминесценции позволяет изучить состав, структурные особенности, определить концентрацию центров люминесценции, исследовать деградацию диэлектрических слоев в результате воздействия сильного электрического поля.

#### Литература

1. Барабан, А. П. Электроника слоев  $\text{SiO}_2$  на кремнии / А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. – Л. : Изд. ЛГУ, 1988. – 304 с.
2. Baraban, A.P. Electroluminescence of  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  structures / A.P. Baraban [et al.] // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28, № 12. – P. 978–980.

УДК 681.7.068

### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Ксенофонов М.А.<sup>1</sup>, Поляков А.В.<sup>2</sup>, Сырель А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко БГУ», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Непрерывное развитие самостоятельного направления в индустрии – кислородной промышленности – обуславливает все возрастающие требования к точности и динамизму измерений при производстве и использовании кислорода. В

результате ведутся интенсивный поиск и исследования физических принципов построения различных сенсорных устройств, способных удовлетворить этим требованиям. Кислород является самым распространённым окислителем на



Земле. Ни одно предприятие, в основе которого задействованы биотехнологии, не может обходиться без устройств, способных измерять уровень кислорода. Это такие отраслевые организации как металлургия (цветная и чёрная), фармацевтика, электростанции (ТЭЦ, ГРЭС, АЭС), пищевое производство, службы, отвечающие за охрану окружающей среды, медицина и нефтепромышленность.

Большинство традиционных датчиков для обнаружения и измерения концентрации кислорода основаны на изменении их сопротивления и емкости, которая может быть легко нарушена с помощью электрического или магнитного поля, а тем более, они будут создавать проблемы безопасности, если они используются в легко воспламеняемых или взрывоопасных случаях. Оптоволоконные датчики газа имеют такие характеристики, как высокая точность, защиту от воздействия электрического и магнитного полей, безопасность использования. Проведенный анализ конструктивных решений волоконно-оптических датчиков концентрации кислорода показал [1–4], что в них оптическое волокно используется, как правило, только как канал передачи информации. Однако, современные тенденции развития оптоволоконных измерительных устройств свидетельствуют о том, что оптоволоконно может применяться одновременно и в качестве чувствительного элемента и как информационный тракт.

Нами предложен новый тип волоконно-оптического магнитострикционного датчика, принцип измерения которого основан на регистрации частоты (периода) рециркуляции одиночных оптических импульсов на различных длинах волн, распространяющихся в замкнутом оптоволоконном контуре. Данная структура хорошо согласуется с трубопроводами различного диаметра. Внутри измерительной трубки располагаются полосы из магнитострикционного материала, называемым металлическим стеклом. На этих полосках расположено оптическое волокно, достаточно жестко закрепленное, например, цианоакрилатом. Поверх этой конструкции навита электрическая катушка для формирования постоянного магнитного поля  $H_0$  во внутреннем объеме трубки. При изменении величины магнитного поля происходит изменение длины магнитострикционных полос, и, следовательно, длины волоконного световода (ВС) и как следствие, частоты рециркуляции.

В качестве чувствительного элемента использовалось стандартное телекоммуникационной многомодовое градиентное волокно 50/125 мкм фирмы Corning, имеющее толщину защитного полиимидного покрытия  $65 \pm 5$  мкм и полный наружный диаметр  $d_b = 255$  мкм. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно изогнуто столь сильно, что поверхност-

ные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие:  $d > 500D_{bc} - 2h_1$ , где  $D_{bc}$  – диаметр оболочки ВС (125 мкм),  $h_1$  – толщина слоя защитного покрытия ( $h_1 = 65$  мкм), т. е.  $d > 6$  см.

В основе принципа измерений лежит такое специфическое свойство газообразного кислорода, как парамагнетизм, так как именно кислород среди наиболее распространенных газов обладает парамагнитными свойствами, поскольку у него спины обобщенных электронов нескомпенсированы. Физическая сущность парамагнетизма кислорода состоит в том, что молекула кислорода в свободном состоянии обладает постоянным магнитным моментом  $P_m$ , не зависящим от внешнего магнитного поля  $H$ . Если некоторый объем  $V$ , заполненный  $O_2$ , поместить в постоянное магнитное поле  $H_0$ , произойдет его намагничивание, вследствие чего действующее поле  $H_0$  изменится на  $\Delta H$ :

$$\Delta H = K \chi_i H_0,$$

где  $K$  – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз используемый измерительный объем отличается от единичного;  $\chi_i = \chi_i(N_0, \theta)$  – парамагнитная восприимчивость единицы объема, являющаяся функцией концентрации  $N_0$  и температуры  $\theta$  кислорода в выбранном объеме. Образец магнитострикционного материала преобразовывает  $\Delta H$  в изменение своей длины. В результате, продольная линейная (по направлению магнитного поля) деформация магнитострикционного материала  $\Delta l$ , помещенного в это поле, с некоторой эффективностью  $\gamma$  преобразовывается в изменение оптического пути  $\Delta(n_0L)$  жестко связанного с ним оптического волокна, где  $n_0$  и  $L$  – показатель преломления и длина отрезка волоконного световода, соответственно. Изменение оптического пути светового потока приводит к изменению периода рециркуляции  $\Delta T$  одиночного импульса в замкнутом оптоэлектронном контуре [5]:

$$\Delta T = \frac{2\Delta n_0}{c} n \gamma \xi,$$

где  $\Delta l$  – изменение длины ВС, подвергающегося деформирующему воздействию;  $n_0$  – показатель преломления сердцевины ВС;  $c$  – скорость света;  $n$  – число магнитострикционных полос в измерительной трубке;  $\xi$  – коэффициент, обусловленный эффектом фотоупругости материала ВС, который для кварцевого волокна составляет величину 0,78. Типичные значения  $\gamma$  для системы одномодовое кварцевое волокно без оболочки – тонкая прямоугольная полоска магнитострикционного материала, элементы которой скреплены органическим клеевым составом, попадают в диапазон значений  $0,3 \leq \gamma \leq 0,9$ .

Связь между изменением длины магнитного материала  $\Delta l$  и изменением магнитного поля  $\Delta H$ , обусловленном присутствием кислорода в измерительном объеме задается соотношением [6, 7]:

$$\Delta l/l \approx CH_0 \Delta H(N_0, \theta),$$

где

$$C = 3/2 \lambda_s H_c^{-2} (1 + N \mu_m)^2 (n S_f E_f S_m^{-1} E_m^{-1})^{-1} -$$

эффективная константа магнитоупругости подсистемы, учитывающая свойства собственно ферромагнетика, его формы и механической нагруженности из-за сопряжения с волокном. Здесь  $\lambda_s$  – магнитоупругость насыщения при слабой анизотропии;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\mu_m$  – максимальная магнитная проницаемость;  $n$  – число витков ВС;  $S_f = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $E_f = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$  – сечение и модуль упругости ВС, соответственно. Параметры ферромагнетика имеют следующие типичные значения:  $\lambda_s = 3 \cdot 10^{-5}$ ;  $H_c = 16 \text{ А/м}$ ;  $\mu_m = 2 \cdot 10^4$ ;  $E_m = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ . Насыщаемость магнитоупругости отклика для элементов из «металлического стекла» начинает заметно проявляться уже при  $H_0 \approx 10^3 \text{ А/м}$ .

Зависимость парамагнитной восприимчивости от концентрации  $N_0$  и температуры  $\theta$  кислорода имеет вид:

$$\chi_i = \frac{p_m^2}{3k\theta} \mu_0 N_0,$$

где  $p_m$  – магнитный момент молекулы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $k$  – постоянная Больцмана.

Магнитный момент молекулы  $p_m = g\sqrt{J(J+1)}\mu_B$ , где  $J$  – квантовое число;  $\mu_B = he/4\pi m_e = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  – магнетон Бора;  $g$  – множитель Ланде. Для кислорода  $g = 2, J = 1$ .

Разрешающая способность предложенного метода оценивалась из условия:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \chi_{\max},$$

где  $\chi_{\max}$  – максимальное значение относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции (для длин ВС более 100 м  $\chi_{\max} = 2 \cdot 10^{-6}$ ).

Период рециркуляции при начальных параметрах:

$$T_0 = \frac{2n_0}{c} (L_0 + nL_T + \pi r(n-1)),$$

$$L_i = L_0 - 2r, L = L_0 + n \cdot L_T + \pi r \cdot (n-1)$$

где  $L$  – общая длина волоконного световода;  $L_0$  – длина внешней части волокна;  $L_T$  – длина ВС, закрепленная на магнитоупругой полоске и подвергающаяся деформации;  $L_T$  – длина измерительной трубки;  $r$  – радиус изгиба ВС (3 см).

Число магнитоупругих полосок определяем по формуле:

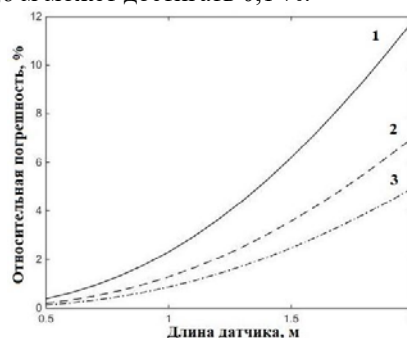
$$n = \frac{2\pi R_0}{d+h},$$

где  $d$  – расстояние между полосами ( $d = 2r$ );  $h$  – ширина полосы.

Из приведенных выше формул получаем выражение для анализа разрешающей способности датчика при комнатной температуре:

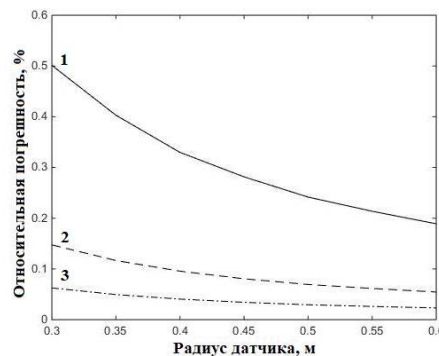
$$N_0^{\min} = \frac{\chi_{\max} 3k\theta}{nCH_0^2 K p_m^2 \mu_0 \gamma \xi L_T} \cdot \frac{L}{L_T}.$$

Были проведены расчеты относительной погрешности измерения в зависимости от параметров чувствительного элемента для воздуха (рис.1, 2). Из рисунков следует, что увеличение длины чувствительного элемента увеличивает погрешность, увеличение радиуса уменьшает погрешность. Относительная погрешность измерения концентрации кислорода в воздухе при длине датчика, равной 0,7 м и радиусе датчика 0,3–0,6 м может достигать 0,1 %.



радиус датчика: 1– $R_T=0,2$  м; 2– $R_T=0,3$  м; 3– $R_T=0,4$  м

Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности от длины датчика



площадь сечения магнитоупругой полоски: 1– $S_m=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (1,5 см×1 см); 2– $S_m=2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (1,5 см×1,5 см); 3– $S_m=3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (2 см×1,5 см)

Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности от радиуса датчика

Для достижения данной погрешности интерференционным датчиком [7], необходимо осуществлять регистрацию изменения тока порядка 20 нА, что является достаточно сложной технической задачей выделения таких малых сигналов на уровне шумов.

Предложена схема чувствительного элемента определения концентрации газообразного кисло-

рода, основанная на использовании структуры, состоящей из магнитоотрицательного материала (металлическое стекло) и волоконного световода, помещенных в однородное магнитное поле. Данный чувствительный элемент может использоваться в структуре квазираспределенных волоконно-оптических измерительных систем рециркуляционного типа. Установлено, что изменяя размеры чувствительного элемента, может быть достигнута относительная погрешность измерений концентраций менее 0,1 % для воздуха.

### Литература

1. Use of an optical oxygen sensor to measure dissolved oxygen in seawater / Hiroshi Hasumoto [et al.] // *Journal of Oceanography*. – 2006. – Vol. 62, № 2. – P. 99–103.
2. Preparation and properties of sensing membrane for fiber optic oxygen sensor / De-sheng Jiang [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology*. – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 51–53.

3. Basu, B. J. Studies on the oxygen sensitivity and microstructure of sol-gel based organic-inorganic hybrid coatings doped with platinum porphyrin dye / Bharathibai J. Basu, Jeevan Kamble // *J Sol-Gel Sci Technol*. – 2009. – Vol. 52, № 1. – P. 24–30.

4. Gewerh, P.M. Optical oxygen sensor based on phosphorescence lifetime quenching and employing a polymer immobilised metallophosphorin probe / P.M. Gewerh, T.D. Delphy // *Med.& Biol. Eng.&Comput.* – 1999. – Vol. 31. – P. 2–10.

5. Поляков, А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014. – 208 с.

6. Ксенофонтов, М.А. Устройство измерения концентрации кислорода / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // *Фотоника*. – 2010. – № 4. – С. 44–48.

7. Липатов, Н.И. Волоконно-оптический магнитоотрицательный датчик концентрации свободного кислорода / Н.И. Липатов, В.В. Саханова // *Измерительная техника*. – 2004. – № 7. – С. 50–53.

УДК 681.785.554

## МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МГНОВЕННОЙ ГИПЕРСПЕКТРОСКОПИИ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Особый интерес для спектроскопии с пространственным разрешением представляют решения, пригодные для регистрации нестационарных процессов, в том числе, обеспечивающие получение полного куба данных  $I(x, y, \lambda)$  в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [1], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС). Перспективный вариант прибора для МГС формирует проекцию куба данных в виде совокупности локальных спектров от отдельных фрагментов объекта, осуществляя пространственную фильтрацию маской регулярно расположенных микрощелей. Благодаря использованию дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента (вместо обычных для подобных решений призм) он обладает высокой и практически неизменной в рабочем спектральном диапазоне дисперсией [2]. Данный подход предусматривает размещение пропускающей дифракционной решетки вблизи от многощелевой маски в расходящихся пучках от микрощелей. Можно показать, что линейная дисперсия такого спектрометра:

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{m}{t \cos \beta} \Gamma,$$

где  $h$  – расстояние от маски до решетки,  $\Gamma$  – увеличение системы,  $m$  и  $\beta$  – порядок и угол дифракции,  $t$  – период решетки. Отсюда следует, что дисперсию системы можно варьировать

перемещением решетки вдоль оптической оси (изменением  $h$ ).

Формирование изображения на детекторе после дифракционной решетки осуществляется телецентрической системой из двух изображающих объективов с небольшим рабочим отрезком, настроенных на бесконечность и расположенных так, что их передние фокусы совпадают. Диафрагма, размещенная в точке совпадения фокусов, пропускает лишь пучки нужного порядка, что в совокупности с полосовыми светофильтрами на входе системы решает типичную для систем с дифракционной решеткой проблему отсекаания всех порядков дифракции кроме рабочего: светофильтры отсекают порядки  $|m| > 1$ , а диафрагма исключает 0-й порядок и ненужный 1-й либо -1-й.

Предложенный подход реализован в двух разработанных схемных решениях спектрометров. В первом [2] телецентрическая система построена на основе двух короткофокусных изображающих объективов, настроенных на бесконечность (для моделирования использованы объективы Nikon Nikkor AF 50mm 1.4D). Для оценки изображающих характеристик системы проведено численное моделирование в программе ZEMAX® (рабочий спектральный диапазон 405–700 нм, пропускающая дифракционная решетка 300 штрих./мм, толщина подложки маски и дифракционной решетки 2 мм, материал – стекло BK7). Результаты

показали, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии  $\Delta l \leq 15$  мкм (предел разрешения  $\delta\lambda \leq 10$  нм), лишь в незначительных по площади областях на краю рабочего спектрального диапазона  $\Delta l \leq 20$  мкм, что соответствует пределу спектрального разрешения  $\delta\lambda \leq 14$  нм.

Обойти ограничение на спектральный рабочий диапазон из-за использования рефрактивных объективов позволяет второе разработанное схемное решение на основе рефлективных объективов – внеосевых парабол [3]. Такие объективы обеспечивают высокое качество изображения при работе в параллельных пучках при малом поле изображения относительно фокусного расстояния объектива. В нашем случае числовая апертура пучков на входе в многощелевую маску будет невелика ( $NA = 0,042$ , относительное отверстие 1:12). Это позволяет предположить, что aberrации зеркал и размеры кружков рассеяния также будут малы даже при относительно протяженном поле изображения. Схема включает два зеркальных объектива в симметричной телецентрической установке, в общей фокальной плоскости которых расположена диафрагма для блокирования порядков дифракции.

Численное моделирование системы проводилось в спектральном диапазоне 450–750 нм, подложки маски и решетки – кварц. Угол отклонения оптической оси  $30^\circ$ , диаметр рабочей области 50,8 мм, радиус кривизны 254 мм, эффективное фокусное расстояние 136,12 мм, фокусное расстояние образующей параболы 127 мм. Результаты показывают, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии преимущественно  $\Delta l \leq 10$  мкм ( $\delta\lambda < 10$  нм), лишь в отдельных точках поля  $\Delta l \leq 15$  мкм ( $\delta\lambda \leq 12$  нм).  $\Delta l$  в направлении, ортогональном направлению дисперсии, не превышает 25–30 мкм.

В данной оптической системе объектив микроскопа работает с наклонным полем объекта и изображения, что обусловлено желанием получить дифракцию под углом  $0^\circ$  для пучков центральной длины волны диапазона. Однако для объектива микроскопа, как правило, не рассчитанного на работу с наклонным полем, это приводит к увеличению размера кружков рассеяния в промежуточной плоскости (на маске). Более того, в ряде случаев (например, при использовании телескопа для наблюдения астрономических объектов) получить наклонное поле промежуточного изображения затруднительно. Поэтому был разработан и проанализирован вариант оптической системы с нормальным падением пучков на маску; соответственно, поля объекта и изображения в такой системе наклонные (в данном случае наклон последнего относительно перпендикулярного к оптической оси положения приблизительно  $10^\circ$ ). Численное моделирование показало, что в такой системе полуши-

рина кружков рассеяния практически остается неизменной, длина спектра уменьшается (в пределах 5%), что, по-видимому, обусловлено неколлинеарностью (схождением) оптических осей диспергированных пучков с разными длинами волн.

Также моделирование показало, что другим фактором, ухудшающим характеристики изображения на детекторе, является неплоское поле изображения. Для корректировки предлагается использовать плоско-выпуклую линзу, расположенную непосредственно перед детектором. Согласно теоретическому расчету, при радиусе кривизны поля изображения  $\sim 100$  мм достаточно использовать кварцевую линзу радиусом 30 мм. Численное моделирование подтвердило справедливость такой оценки и показало, что при этом размеры кружков рассеяния существенно уменьшаются – до 7–10 мкм (полуширина).

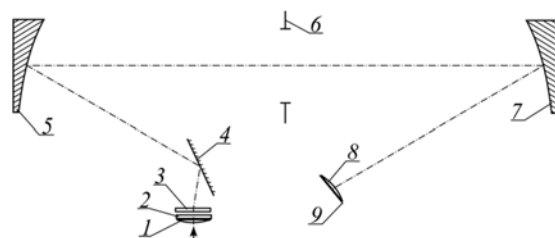


Рисунок 1 – Принципиальная схема многощелевого спектрометра с дифракционной решеткой:

- 1, 8 – плоско-выпуклая линза, 2 – маска на подложке,
- 3 – дифракционная решетка, 4 – плоское зеркало,
- 5, 7 – параболическое зеркало, 9 – детектор

Наконец, рассмотрено схемное решение, представляющее собой синтез обоих упомянутых выше подходов (рисунок 1). Для коррекции кривизны поля используется линза 8, но поле изображения расположено наклонно к оптической оси (формирующие изображение световые пучки наклонно падают на корректирующую линзу). Соответственно, достигается нормальное падение пучков на многощелевую маску 2. Наилучшие результаты коррекции были получены для параметров линзы, аналогичных использованному в рассмотренном выше схемном решении. Согласно результатам моделирования, полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии  $\Delta l \leq 10$  мкм, лишь в отдельных точках поля  $\Delta l \leq 15$  мкм. Вследствие того, что дисперсия в данной системе несколько выше, чем в исходной рефлективной [3] (максимальная величина по полю  $\sim 1,5 \times 10^{-3}$  мм/нм), для точек поля  $\delta\lambda \leq 10$  нм.

На основании результатов моделирования можно заключить, что как рефрактивное, так и рефлективное схемное решение пригодны для реализации на их основе МДС. Рефрактивное компактнее, но и более ограничено по спектральному рабочему диапазону. Рефлективное обеспечивает расширенный рабочий спектраль-

ный диапазон и имеет меньший предел разрешения. Рассмотренные варианты решений позволяют также обеспечить для входного поля перпендикулярность оптической оси системы, расширив область применения за счет снижения ограничений на выбор системы формирования входного изображения.

Данные решения технологически просты, приборы на их основе могут применяться, например, в биомедицинских приложениях, обеспечивая МГС с пространственным разрешением до  $2 \times 10^4$  и спектральным разрешением на уровне 10 нм для спектрального диапазона 400–700 нм.

УДК 621.372.821.1

### ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБОРНОСТИ МИКРОЧИП ЛАЗЕРА ИЗЛУЧАЮЩЕГО В ОБЛАСТИ 2 МКМ С ЗАТВОРОМ НА ОСНОВЕ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Гусакова Н.В.<sup>1</sup>, Демеш М.П.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Choi S.Y.<sup>2</sup>, Rotermund F.<sup>2</sup>, Павлюк А.А.<sup>3</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Korea Advanced Institute of Science and Technology, Yuseong-gu, Daejeon 34141, South Korea

<sup>3</sup> Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Импульсные лазерные источники спектральной области 2 мкм представляют интерес для ряда практических применений таких как: хирургические лазеры системы, системы прецизионной обработки, системы дистанционного зондирования атмосферы (LIDAR), системы оптической связи, а также системы измерения скорости ветра (Doppler-LIDAR) с целью повышения безопасности полетов. Излучение с длиной волны 2 мкм, позволяет проводить анализ концентраций ряда атмосферных газов (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O), что является необходимым при экологическом мониторинге окружающей среды. Кроме того, излучение с длиной волны более 2 мкм может быть эффективно преобразовано в средний ИК-диапазон (3-8 мкм) с помощью нелинейных кристаллов [1].

Для получения генерации в области 2 мкм используют кристаллы, активированные ионами тулия и гольмия. В последнее время возрастает интерес к созданию компактных систем, излучающих в области 2.1 мкм на основе кристаллов со-активированных ионами Tm и Ho. Ключевым достоинством таких систем является возможность их накачки в области 800 нм коммерчески доступными AlGaAs лазерными диодами.

Для реализации импульсного режима генерации часто используют режим пассивной модуляции добротности. В последнее время в качестве пассивных затворов для таких систем было предложено использовать насыщающиеся поглотители на основе наноматериалов [2-5]. Достоинством пассивных затворов на основе углеродных нанотрубок является широкая полоса поглощения E<sub>11</sub> в области 1.9-2.1 мкм, позволяющая

### Литература

1. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies // Opt. Engineering. – 2013. – Vol. 52, № 9. – P. 090901-1–090901-23.

2. Гулис И. М., и др. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 3. – С. 4–11.

3. Гулис И. М., и др. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

использовать их в качестве пассивных затворов для тулиевых и гольмиевых лазеров, сравнительно простая и дешевая технология синтеза и быстрое время релаксации просветленного состояния [3]. Режим пассивной модуляции добротности с использованием затвора на основе углеродных нанотрубок был реализован впервые с кристаллом Tm, Ho:YAP [6]. В настоящей работе впервые получен режим модулированной добротности Tm, Ho:KYW микрочип лазера с затвором на основе однослойных углеродных нанотрубок.

Схема лазера представлена на рисунке 1.

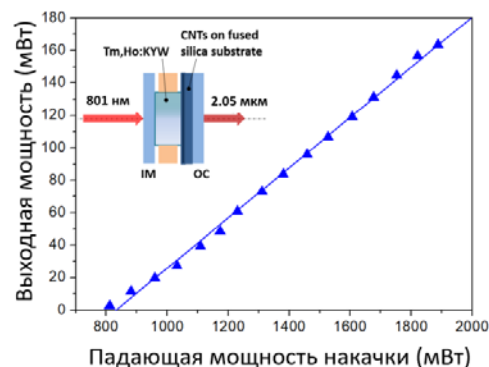


Рисунок 1 – Зависимость выходной мощности Tm, Ho:KYW микрочип лазера работающего в режиме пассивной модуляции добротности от падающей мощности накачки

Кристалл Tm (5 at.%), Ho (0.5 at.):KYW толщиной 2.5 мм вырезанный вдоль оси оптической Ng был обернут в индиевую фольгу и закреплен в медном теплоотводе. Температура кристалла поддерживалась на уровне 15°C и регулировалась

элементом Пельтье. На входную и выходную грани активного элемента были нанесены антиотражающие покрытия для длин волн накачки и лазерной генерации. Плоское входное зеркало располагалось в непосредственной близости к входной грани активного элемента. Пассивный затвор на основе углеродных нанотрубок, нанесенный на кварцевую пластинку толщиной 1 мм и плоское выходное зеркало располагались вплотную к выходной грани кристалла. Воздушные зазоры между элементами были менее 0.5 мм, общая длина резонатора составляла ~ 3.5 мм. Пропускание выходного зеркала резонатора составляло 2 %, начальное пропускание затвора на длине волны 2053 нм – 98 %. Накачка лазера осуществлялась AlGaAs лазерным диодом с длиной волны 801 нм и волоконным выводом излучения (диаметр волокна-125 мкм,  $M^2=25$ ). Диаметр пятна накачки в кристалле составлял 100 мкм.

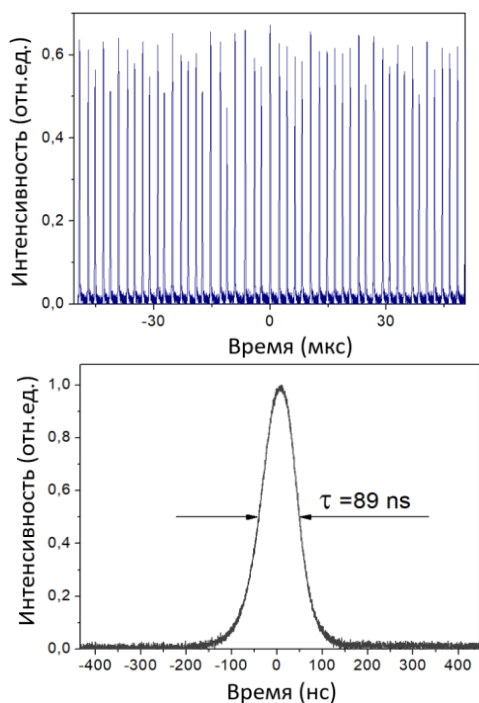


Рисунок 2 – Осциллограммы выходного излучения лазера в режиме пассивной модуляции добротности

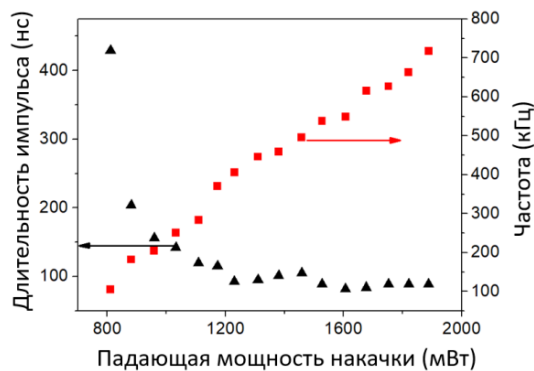


Рисунок 3 – Зависимость выходных характеристик Tm, Ho:KYW лазера от падающей мощности накачки

На рисунке 1 представлена зависимость выходной мощности лазера в режиме пассивной модуляции добротности от падающей на кристалл мощности накачки. В кристалле поглощалось более 95 % падающей мощности накачки. С ростом мощности накачки длительность импульсов сокращалась с 429 до 89 нс (рис. 2), частота следования импульсов возрастала от 105 до 717 кГц (рис. 3).

Максимальная выходная мощность лазера составила 166 мВт при падающей мощности накачки 1.88 Вт и ограничивалась максимальной мощностью источника накачки. Дифференциальная эффективность по падающей мощности накачки составляла 15 %. Энергия импульса составляла 0.22 мкДж, пиковая мощность – 2.65 Вт, при частоте следования импульсов 717 кГц и длительности импульса 89 нс.

Лазер излучал на длине волны 2057 нм. Излучение лазера было поляризовано вдоль оси оптической индикатрисы  $N_m$ . Лазер работал в режиме генерации  $TEM_{00}$  моды. Спектр генерации и пространственное распределение интенсивности в поперечном сечении пучка генерации представлены на рисунке 4.

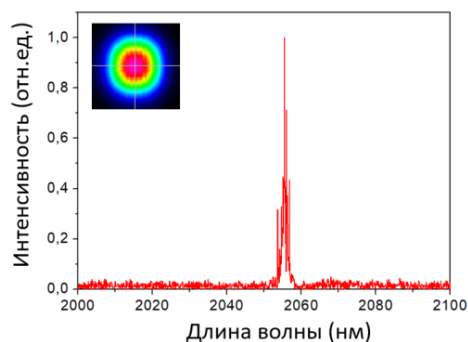


Рисунок 4 – Спектр генерации микрочип лазера и пространственное распределение интенсивности поперечном сечении пучка генерации

### Литература

1. K. Scholle, S. Lamrini, P. Kookmann and P. Fuhrberg, 2 $\mu$  laser sources and their possible applications (Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics B Pal. Ed., InTech, Rijeca, Croatia, 2010)
2. S.Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski, «Laser Mode Locking Using a Saturable Absorber Incorporating Carbon Nanotubes», J. Lightwave Technol. 22, 51 (2004).
3. W.B. Cho, A. Schmidt, J.H. Yim, S.Y. Choi, S. Lee, F. Rotermund, U. Griebner, G. Steinmeyer, V. Petrov, X. Mateos, M.C. Pujol, J.J. Carvajal, M. Aguilo, F. Diaz, «Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2  $\mu$ m using a carbon nanotube saturable absorber», Opt. Express 13, 11007 (2009).
4. G.Q. Xie, J. Ma, P. Lv, W.L. Gao, P. Yuan, L.J. Qian, H.H. Yu, H.J. Zhang, J.Y. Wang, and D.Y. Tang, «Graphene saturable absorber for Q-switching and mode locking at 2  $\mu$ m wavelength», Opt. Mater. Express 2, 878 (2012).

5. S.W. Wang, H. Yu, H. Zhang, A. Wang, M. Zhao, Y. Chen, L. Mei, J. Wang, «Broadband Few-Layer MoS<sub>2</sub> Saturable absorber», Adv. Mater. 26, 3538 (2014).

6. T.L. Feng, S.Z. Zhao, K.J. Yang, G.Q. Li, D.C. Li, J. Zhao, W.C. Qiao, L.H. Zheng, J. Xu, G.J. Zhao, Y.G. Wang, «A diode-pumped passively Q-switched Tm,Ho:YAP laser with a single-walled carbon nanotube», Las. Phys. Let., 10(9), 6 (2013).

УДК 621.382.019.3

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ С МАЛЫМ ТЕЛОМ СВЕЧЕНИЯ

Манего С.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Для определения срока службы светоизлучающих устройств (СУ) широко используются методики ускоренных испытаний при повышенных значениях температуры окружающей среды ( $T_A$ ) и прямого тока ( $I_F$ ). В основу этих методик могут быть положены различные теоретические модели и механизмы деградации светового потока светоизлучающего устройства. Аналогия процесса старения, описанного моделью и реальных процессов старения СУ, определяющих их надежность, признается как неформальная многими исследователями. Поскольку скорость дрейфа параметров весьма мала, то для ее увеличения и оценки других составляющих модели используют форсированные испытания СУ при повышенных температурах и токах нагрузки.

Анализ практики передовых мировых производителей светодиодных устройств позволил сделать вывод, что непосредственным результатом превращения качества в основной фактор конкурентоспособности стал отказ от методов контроля и отбраковки как средства обеспечения надежных свойств и выработки гарантий качества для потребителей. Среди причин, ограничивающих возможность применения этих методов в современных условиях, можно указать: стоимостные (обеспечение надежности компонентов за счет жестких методов тестирования, что многократно увеличивает их себестоимость), физические (существуют физические пределы повышения надежности продукции за счет отбраковочных испытаний), организационные (длительность стандартизированных процедур аттестации качества электронных компонентов приходит в противоречие с короткими циклами разработки), сравнительно низкий уровень гарантий качества. Невозможность эффективно разрешить указанные ограничения стимулировала переход к более совершенным методам оценки и прогнозирования надежности СУ, основным на концепции предотвращения появления дефектов и статистического подхода в оценке надежных параметров СУ. Одним из таких методов предлагается использовать люминесцентные методы исследования деградации СУ.

Известно, что спектры спонтанного излучения светодиодных излучателей (СИ) содержат информацию о физических особенностях излучательного процесса в активной среде светодиода. Однако интерпретация спектра как интегральной характеристики обычно осложняется в силу наложения одновременно многих факторов: перегрев активной области СИ, неравномерного распределения состава в активной области, неравномерное распределение плотности тока, как активной области СИ, так и по всей матрице СУ. Все эти факторы формируют усредненную форму спектра излучения, которая описывается в рамках лоренцев форм-фактора для однородного уширения [1]. В работе для получения объективной информации о надежности СУ содержащих светодиоды с малым телом свечения (СИД с МТС), с учетом комплексного влияния всех воздействующих факторов, была проведена количественная оценка изменения параметров спектров электролюминесценции СИД с МТС.

Для анализа спектров люминесценции светодиодов использовались светодиоды на основе структур твердых растворов AlInGaP/GaAs. Такие твердые растворы используют для создания сверхъярких светодиодов, излучающих в красном, оранжевом и желтом диапазонах видимого спектра. Отметим, что при изменении состава в точке пересечения экстремумов Г-Х, свойства AlInGaP изменяются, он становится непрямозонным полупроводником, эффективность его излучения заметно понижается. Для высокой эффективности светодиодов вблизи точки пересечения энергия излучения должна быть меньше ширины запрещенной зоны на несколько кТ, что являются базовым вариантом структур для современных лазеров и светодиодов. Для анализа спектров люминесценции были отобраны две группы светодиодов с малым телом излучения (Группа № 1 и Группа № 2), созданных на основе чипа AlInGaP/GaAs (ELC-645-29-20) фирмы EPIGAP Optoelectronic GmbH, группа № 1 (20 шт.) в корпусе КТ-1-4.04НБ и группа № 2 (20 шт.) – корпус КУТ-32 (ГОСТ 16504-81). При создании светодиодов группы № 1 и № 2, для

некоторых светодиодах, проводилась повторная разварка проволоочки. Мощность ультразвуковой волны приварки контактных проволоочек была: для светодиодов группы № 1-1-ая сварка – 0,3875 Вт, 2-ая сварка – 0,0375 Вт. (20 шт.). Для светодиодов группы № 2, разварка проволоочек проводилась при мощностях: 1-ая сварка – 0,5125 Вт, 2-ая сварка – 0,2 Вт. (20 шт.). Максимум интенсивности излучения светодиодов ( $\lambda \cong 645$  нм). Режимы форсированных испытаний проводились с коэффициентами ускорения  $K_p$  при  $T = 80$  °C и  $T = 120$ °C ( $K_p = 0,236$  и  $K_p = 0,45$  соответственно). Термоэлектрический отжиг проводился при следующих условиях ( $I_n = 10$  mA,  $T = 80$  °C и  $110$  °C,  $t = 1400$  ч).

Спектры люминесценции при температуре ( $T = 293$ ° K) и тока накачки (0,05-10 mA) представлены на рисунке 1.

Анализ экспериментальных данных показал, что краевые полосы люминесценции соответствуют стандартным форм-факторам (с гауссовым и лоренцевым уширением). Для описания реальных спектров электролюминесценции светодиодов применялся форм-фактор в виде  $1/ch$   $\delta$  с экспоненциальными асимптотами.

$$R(h\nu) = \int_0^{\infty} R_0(E)F(E - h\nu, \gamma)dE,$$

где  $F(E - h\nu, \gamma)$  – форм-фактор однородного уширения.

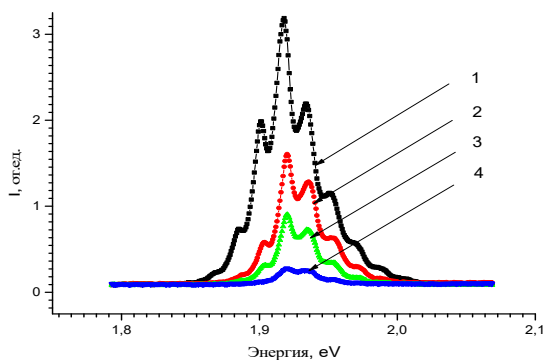


Рисунок 1 – Интенсивность излучения СИД с МТС при токах накачки  $I = 1$ -10mA, 2- 1mA, 3-0,44 mA, 4-0,05 mA

Теоретические расчеты не дают аналитического вида для форм-фактора в промежуточных случаях описывающих различные вклады в однородное уширение всех релаксационных процессов. Численные теоретические расчеты форм-фактора приводят к не-лоренцевой форме, в общем случае – асимметричной форме.

Т.е. не-лоренцевость проявляется прежде всего в крыльях контура, где срезаются лоренцевы асимптоты. Воспользуемся форм-фактором предложенным в работе [2] имеющий асимметричные экспоненциальные асимптоты, определяемые константами  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

Анализ изменения экспоненциальных асимптот  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (Рис. 2) показывает, что с увеличением времени термоэлектрического отжига они убывают. Ширина спектра люминесценции на половине максимума  $\Delta h\nu = 46$  мэВ. Оценка эффективного релаксационного времени показало около 6.3 фс, т.е. данный форм-фактор относится к не-марковскому процессу. Реальные контуры спектров излучения асимметричны.

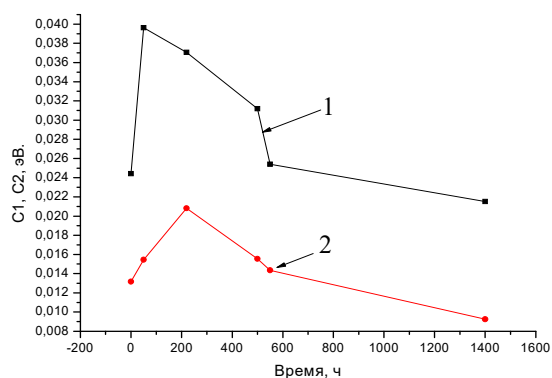


Рисунок 2 – Экспоненциальных асимптот  $\varepsilon_1(1)$  и  $\varepsilon_2(2)$  от длительности термоэлектрического отжига

Таким образом, анализ структуры спектров спонтанного излучения светодиодов с малым телом свечения показал что, с увеличением тока накачки краевая полоса излучения подвержена размытию главным образом за счет однородного уширения коротковолнового края. Анализируя изменение информационных параметров ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\Delta h\nu$ ) от длительности термоэлектрического отжига можно оценить надежность светодиодов с малым телом свечения.

### Литература

1. Елисеев П.Г. Излучение квантово-размерных структур InGaAs. I. Спектры спонтанного излучения / П.Г. Елисеев, И.В. Акимова // Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 4, С. 472–477.
2. Елисеев П.Г. Излучение квантово-размерных структур InGaAs. II. Форм-фактор однородного уширения/ П.Г. Елисеев, И.В. Акимова // Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 4, С. 478–483.



УДК 667.7 + 681.7

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Савицкий А.А.<sup>1</sup>, Натаров В.О.<sup>1</sup>, Гайдук Ю.С.<sup>1</sup>, Хорт А.А.<sup>2</sup>, Лойко П.А.<sup>3</sup>, Паньков В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, Минск Республика Беларусь<sup>3</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес исследователей к изучению углеродных квантовых точек (УКТ) – наноразмерных объектов на основе углерода, способных во многих случаях заменить квантовые точки на основе полупроводниковых материалов. Углеродные квантовые точки отличаются значительно более легким синтезом и нетоксичностью, хотя в большинстве случаев отличаются сравнительно небольшим квантовым выходом люминесценции (3–25 %) [1]. Обычными методами получения УКТ являются гидротермальный и микроволновый синтез, имеются отдельные публикации о получении УКТ частичным пиролизом, ультразвуковым синтезом, химическим окислением. Люминесценция УКТ связывается с наличием на поверхности графенового ядра УКТ поверхностного слоя, содержащего кратные связи углерод–азот и (или) углерод–сера. В качестве прекурсоров используются легкодоступные органические соединения (кислоты, амины, сахара и т. д.).

**Методика эксперимента.** В качестве источников углерода использовались органические кислоты (лимонная, янтарная, молочная), в качестве источников азота мочевины и (или) этилендиамин, в качестве источника серы – тиомочевина. Спектральные характеристики полученных материалов, включая длину волны и интенсивность люминесценции, различаются в зависимости от выбранных прекурсоров и их молярного соотношения. Ряд комбинаций прекурсоров исследовался впервые. УКТ получали двумя способами – растворением в воде кислот и аминов с выбранными мольными отношениями, последующим выпариванием и сжиганием в микроволновой печи (5–15 минут, 360 W), либо смешением исходных реактивов, тщательным перетирированием и сжиганием в муфельной печи (300–350 °С, 0,25–1 ч).

Полученные порошки тщательно измельчались, затем исследовались методами термогравиметрии (ТГ–ДТА), ИК–спектроскопии, флуоресцентной спектроскопии, РФА–анализа.

**Результаты исследования.** Установлено, что ИК–спектры УКТ, синтезированные микроволновым и термическим методом, отличаются весьма незначительно, однако термический способ их синтеза представляется более предпочтительным ввиду простоты масштабирования. Кроме того, водные растворы УКТ, полученные термическим способом, имеют менее выражен-

ную собственную окраску из-за более полного выгорания примесей. Термическая стойкость УКТ составляет 350–360 °С.

Рентгенограммы исследованных материалов отвечают формированию плохо закристаллизованной или близкой к аморфной структуре углерода. На рис. 1 представлена рентгенограмма материала, полученного из смеси лимонной кислоты, ЭДА и мочевины. Рентгенограмма представляет собой sdвоенный широкий пик с максимумами при  $2\theta = 19,0$  и  $23,7^\circ$  (что соответствует наличию двух форм углерода). Полученная дифракционная картина согласуется с литературными данными [2, 3].

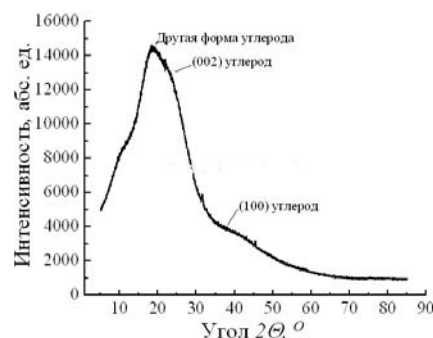


Рисунок 1 – Рентгенограмма материала, полученного из смеси лимонной кислоты, ЭДА и мочевины (UG6)

Спектры поглощения исследованных материалов (рис. 4) имеют характерный для УКТ вид кривых, показывающих сильное поглощение в УФ–области, с хвостом, простирающимся до видимого диапазона. Отдельные пики (максимумы поглощения) могут быть приписаны  $\pi$ – $\pi$ –переходу в связях C=C,  $n$ – $\pi^*$ –переходу в связях C=O и ряду других [3].

Максимум излучения УКТ в большинстве случаев зависит от длины возбуждения флуоресценции, что может быть объяснено квантовыми эффектами (оптический отбор наночастиц разного размера) или наличием на поверхности квантовых точек эмиссионных ловушек. Независимость излучения от длины волны возбуждения при 220–400 нм принято связывать с формированием относительно однородной и хорошо пассивированной поверхности квантовых точек [5]. Выбор определённого оптимального времени синтеза УКТ, помимо способа синтеза, состава и соотношения компонентов исходной смеси оказывает влияние на состояние поверхности получаемых наноматериалов.

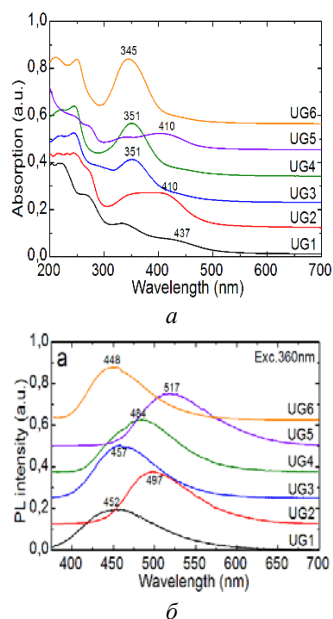


Рисунок 2 – а) Спектры поглощения ряда образцов УКТ (водный раствор) б) спектры люминесценции водных растворов (возбуждение 360 нм):  
 UG1 – лимонная кислота + тиомочевина;  
 UG2, UG5 – лимонная кислота + мочеви́на;  
 UG3, UG4 – лимонная кислота + этилендиамин;  
 UG6 – лимонная кислота + мочеви́на + этилендиамин

Недостаточное время синтеза является причиной неполной карбонизации, что снижает интенсивность флуоресценции конечного материала, избыточное время ведет к ухудшению спектральных характеристик в результате перегрева частиц и разрушения поверхностной структуры. Как показали проведенные нами сравнения, в случае микроволнового синтеза оптимальное время составляет 5–10 минут, в случае термического (270 °C) – 15–30 минут. В таблице 1 представлены характеристики ряда исследованных УКТ в зависимости от длины волны возбуждения флуоресценции.

Максимум поглощения в ультрафиолетовой области исследуемых образцов UG1–UG6 (рис. 2) наблюдался в области 343–358 нм. При этом квантовый выход люминесценции УКТ в водных растворах составлял 20–79 %. Высокий квантовый выход для UG5 (люминесценция в зелёной

области спектра) и UG6 (бело-голубоватое свечение) позволяет использовать полученные материалы в качестве люминесцентных пигментов печатных красок и чернил. Пигменты показали долговременную стабильность в плёнках поливинилового спирта, поливинилбутираля, в печатных лаках на водной основе. С использованием беспигментной прозрачной основы производства Worldwide Manufacturing, E.D. (Киев, Украина) были изготовлены маркировочные люминесцентные чернила для струйных принтеров Canon.

Образец UG6 может представлять интерес в качестве эффективного оптического отбеливателя для бумаги, тканей и других материалов. Стоимость его производства более чем на порядок ниже, чем традиционных отбеливателей на основе стильбена и его производных.

Исследованные материалы могут найти применение в биомедицинских приложениях, в качестве флуоресцентных кислотно-основных индикаторов, в фотокатализе, производстве солнечных элементов и светоизлучающих устройств, пигментов струйных чернил и печатных лаков на водной основе. УКТ, полученные пиролизом смеси лимонной кислоты и ЭДА, щавелевой кислоты и ЭДА, обладающие бело-голубоватым свечением с высоким квантовым выходом (79 %) могут представлять интерес в качестве эффективного оптического отбеливателя для бумаги, тканей и других материалов. Стоимость производства указанных материалов может быть более чем на порядок ниже, чем традиционных отбеливателей на основе стильбена и его производных.

### Литература

1. Lim Sh. Y. Carbon quantum dots and their applications / Sh. Y. Lim, W. Shen, Zh. Gao // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – P. 362–381.
2. Zhai, X. Highly luminescent carbon nanodots by microwave-assisted pyrolysis / X. Zhai [at al.] // Chem. Commun. – 2012. – Vol. 48. – P. 7955–7957.
3. Wang, Ch. Upconversion fluorescent carbon nanodots enriched with nitrogen for light harvesting / Ch. Wang [at al.] // J. Mater. Chem. – 2012. – Vol. 22. – P. 15522–15525.

УДК: 621.373:535

## КИРАЛЬНАЯ И АКИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Учет векторного характера электромагнитного поля предполагает появление радикально нового свойства инвариантности лазерной системы по отношению к преобразованию состояния поляризации излучения. Эффекты симметрии носят междисциплинарный характер, их исследование в оптических и лазерных системах мо-

жет оказаться полезным для объяснения подобных эффектов в нелинейных системах различного физического происхождения: в биологии, экономике, информатике, медицине, и т. д.

Как показано в [1], в анизотропных лазерных системах, обладающих инволютивной симметрией, возможны периодические колебания с различ-

ными свойствами симметрии: симметричный S-цикл и асимметричный M-цикл. Симметрия этих решений аналогична симметрии акиральных и киральных биологических макромолекул (см., напр., [2]). Решения с различными свойствами симметрии претерпевают различные последовательности допустимых бифуркаций, а разложение S-цикла на два M-цикла (возникновение S-цикла в результате слияния двух M-циклов) представляет собой явление нарушения (восстановления) симметрии, которое описывается бифуркацией типа вилки для периодического решения.

Изучение эволюции решений с киральной и акиральной симметрией в анизотропных лазерных системах может оказаться полезным для понимания процессов эволюции в биологии, связанных с происхождением жизни на Земле. Газовые лазеры класса-A, теория которых достаточно хорошо развита, позволяют изучить экспериментально влияние различных физических механизмов, многие из которых существуют или могут быть ассоциированы с механизмами, существующими в природе.

Мы рассмотрим две лазерные системы, модели которых апробированы в эксперименте, и выясним, каким образом конкуренция анизотропии среды и резонатора, продольное магнитное поле, многомодовое взаимодействие, линейная связь генерируемых волн за счет обратного рассеяния, а также случайные флуктуации, оказывают влияние на поведение режимов генерации с киральной и акиральной симметрией [3].

В двухчастотном линейном газовом лазере с линейной фазовой анизотропией резонатора симметричный S-цикл возникает из-за конкуренции анизотропии активной среды и анизотропии резонатора. При этом S-цикл рождается вследствие бифуркации Хопфа и разрушается при увеличении анизотропии резонатора вследствие бифуркации типа седло-узел.

При наложении синусоидального продольного магнитного поля с напряженностью  $H_1$  и частотой  $\omega_f$  на активную среду двухчастотного газового лазера S-цикл существует внутри резонанса (1/1). При увеличении  $H_1$  и постоянной частоте модуляции происходит нарушение поляризационной симметрии, приведенное на рис. 3: S-цикл распадается на два M-цикла. Выбор одного из двух M-циклов в генерации регулируется изменением знака напряженности магнитного поля.

Дальнейшее увеличение  $H_1$  приводит к восстановлению поляризационной симметрии, при этом два M-цикла сливаются и исчезают. Далее фиксируется двумерный симметричный S-тор, претерпевающий резонансы высоких порядков, что подтверждается обнаружением долгопериодических сложных колебаний с периодами  $7T$  и  $9T$ , где  $T$  – период внешнего воздействия.

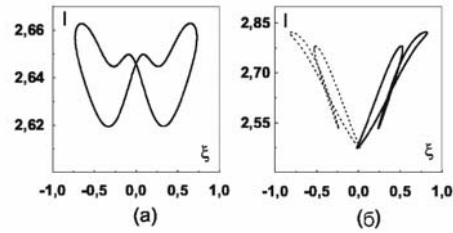


Рисунок 1 – нарушение поляризационной симметрии: S-цикл при  $H_1 = 88.4$  Э(а) и M-циклы при  $H_1 = 90.8$  Э,  $\omega_f = 379.5$  КГц (б)

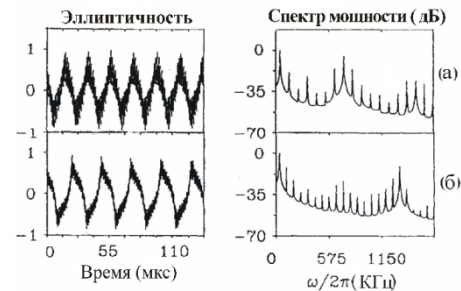


Рисунок 2 – восстановление поляризационной симметрии: S-циклы и соответствующие спектры мощности, рассчитанные при  $\omega_f = 345$  КГц: 7T-цикл при  $H_1 = 107.3$  Э (а) и 9T-цикл при  $H_1 = 240$  Э (б)

При наложении помимо синусоидального постоянного продольного магнитного поля  $H_0$  на активную среду была обнаружена бистабильность асимметричных предельных циклов I и II рода (с колебаниями интенсивности и эллиптичности и с вращением азимута), а также экспериментально наблюдаемый эффект изменения знака вращения азимута, показанные на рис. 3.

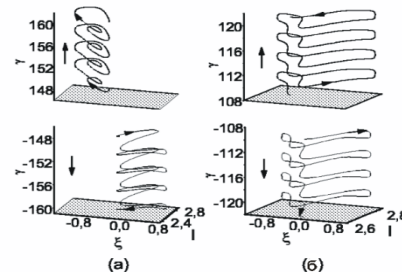


Рисунок 3 – Бистабильность асимметричных M-циклов II рода; T-цикл (а) для  $H_1 = 95.6$  Э,  $\omega_f = 368$  КГц и 2T-цикл (б) для  $H_1 = 45.4$  Э,  $\omega_f = 736$  КГц,  $H_0 = 14.4$  Э; стрелками показано направление вращения азимута по и против часовой стрелки

В четырехчастотном кольцевом газовом лазере с линейной связью встречных волн с эллиптическими неортогональными состояниями поляризации S-цикл возникает при потере устойчивости режимом генерации двух стоячих волн, а M-цикл – четырех бегущих волн. Спонтанное нарушение фазовой симметрии происходит при переходе от режима генерации стоячих волн к режиму генерации бегущих волн. При этом возможно возникновение детерминированного

асимметричного хаоса через последовательность бифуркаций удвоения М-цикла.

В области управляющих параметров, где возникает детерминированный хаос, возможно сосуществование аттракторов с различной топологией – мультистабильность: в зависимости от начальных условий здесь возможен S-цикл, М- аттрактор Фейгенбаума, а также М-аттрактор, возникающий при пересечении бассейнов притяжения двух аттракторов Фейгенбаума.

При малых величинах коэффициента линейной связи был обнаружен М-цикл II рода с колебаниями интенсивности одной из волн вблизи порога генерации, что вызывало чувствительность этого режима к воздействию случайных флуктуаций. В присутствии  $\delta$ - коррелированного белого шума при увеличении отстройки вначале возникали стохастические колебания, затем режим асимметричных хаотических колебаний, за которым следовал М-цикл со сложной формой колебаний. Эволюция данных режимов генерации показана на рис. 4.

Далее вследствие бифуркации типа вилки возникал S-цикл, который терял устойчивость и сменялся симметричным хаосом типа перемежаемости, завершаясь стационарным режимом генерации двух стоячих волн.

Лазерная динамика проявила в эксперименте огромное количество математических законов, присущих нелинейным системам, благодаря чему методы качественной теории дифференциальных уравнений вошли в обиход при изучении процессов эволюции в различных областях человеческой деятельности.

Проведенное в данной работе рассмотрение свойств режимов генерации, обладающих симметрией киральных и акиральных биологических макромолекул, может послужить основой для нового подхода к проблеме киральности в биоло-

гии, в основе которого лежит теория бифуркаций в нелинейных системах с симметрией.

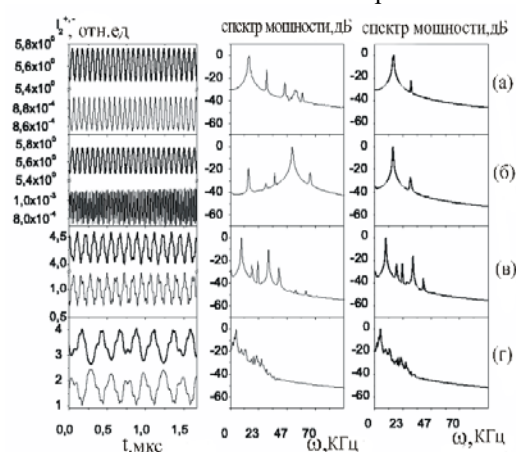


Рисунок 4 – Эволюция временных реализаций для  $I_2^\pm$  (левая колонка), спектров мощности для интенсивностей  $I_2^-$  и  $I_2^+$  (средняя и правая колонки): асимметричный предельный цикл II рода (а), стохастические колебания (б), асимметричный хаос (в), асимметричный предельный цикл со сложной формой колебаний (г)

### Литература

1. Svirina, L.P. Polarization symmetry breaking and restoration in vector-field lasers. / L.P. Svirina // Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics. – 2001. – Vol. 3. – P. S133–S138.
2. Аветистов В.А. Физические аспекты нарушения зеркальной симметрии биоорганического мира / В.А. Аветистов, В.И. Гольданский // УФН – 1996. – Т. 166. – С. 873–891.
3. Svirina, L.P. Chiral and achiral symmetry in dynamics of vector-field lasers / L.P. Svirina // Proceedings of SPIE – 2012. – Vol. 8337. – P. 83370H-1-83370H-6.

УДК 539.264

### СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТИЙ-АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ ОРТОНИОБАТОВ, АКТИВИРОВАННЫМИ ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ

Вилейшикова Е.В.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>2</sup>, Дымшиц О.С.<sup>3</sup>, Маляревич А.М.<sup>1</sup>, Юмашев К.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Государственный Оптический Институт им С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Кристаллы редкоземельных ортониобатов ( $RENbO_4$ , RE= La–Lu, Y) известны их специфическим полиморфизмом. Они подвержены обратному фазовому переходу между их высокотемпературной фазой со структурой шеелита  $CaWO_4$  (тетрагональная Т-фаза, пр.гр. I41/a) и низкотемпературной фазой, изоструктурной минералу фергусониту  $(R)(Nb,Ta)O_4$  (моноклинная М-фаза, I2/a). Данный переход носит непрерывный характер и сопровождается очень

быстрой перестройкой структуры с существенной деформацией элементарной ячейки, которая наводит случайные микронапряжения в кристаллической матрице. М-фаза и Т-фаза структурно связаны между собой. Они преобразуются одна в другую в результате искажения тетраэдров  $NbO_4$  со смещением ионов  $Nb^{5+}$  вдоль кристаллографического направления  $c$  в тетрагональной структуре Т-фазы (или эквивалентной оси  $b$  в моноклинной ячейке М-фазы) [1]. Ионы

активаторы  $RE^{3+}$  координируются в окружении 8-ми тетраэдров  $[NbO_4]^{3-}$ , рис. 1. В случае Т-фазы  $RE^{3+}$  находится в позиции с точечной симметрией  $S_4$ , и в случае моноклинной фазы в позиции симметрии  $C_2$ .

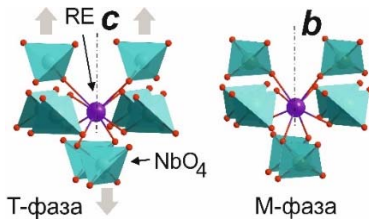


Рисунок 1 – Координация редкоземельного иона-активатора RE в Т- и М-фазе  $YNbO_4$

Ранее было показано, что наноразмерные кристаллы  $RENbO_4$  ( $RE=Y, Yb, Eu$ ) литий-алюмосиликатной стеклокерамики испытывают структурную перестройку Т-фазы в М-фазу при термообработке стекла, содержащего в объеме аморфной стекломассы тетрагональные нанокристаллы  $RENbO_4$ , при  $T=900^\circ C$ . При этом, спектроскопические характеристики ионов-активаторов стеклокерамики существенно изменяются: полосы поглощения и люминесценции структурируются, возрастают пиковые значения поперечных сечений поглощения и испускания [2]. В настоящей работе представлены результаты исследования спектроскопических характеристик ионов гольмия  $Ho^{3+}$  в наноструктурированной стеклокерамике, содержащей тетрагональную Т- и моноклинную М-фазу  $Ho^{3+}:YNbO_4$ .

Стеклокерамики были синтезированы и их структура исследована сотрудниками НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова». Исходное стекло системы 18 (мол.%)  $Li_2O$  - 27  $Al_2O_3$  - 55  $SiO_2$  [2], активированное редкоземельными оксидами, 2.2 мол.%  $Y_2O_3$ , 0.5 мол.%  $Ho_2O_3$  и оксидом ниобия, 3.7 мол.%  $Nb_2O_5$  в качестве катализатора кристаллизации, приготовлено в тигле из кварцевой керамики при  $T = 1580^\circ C$  в течение 4 ч. Варка стекла сопровождалась перемешиванием расплава. С целью удаления ОН-групп в процессе варки стекломасса барботировалась кислородом на протяжении 0.5 ч. После варки стекломасса была вылита на металлическую плиту и подвергнута отжигу при температуре  $T = 620^\circ C$ . Далее отожженное стекло инерционно охлаждалось до комнатной температуры.

Для запуска процесса кристаллизации стеклокерамики исходное стекло было подвержено вторичной термической обработке при температурах от  $T = 720$  до  $1000^\circ C$  в течение 6-24 ч на воздухе, с последующим инерционным остыванием до комнатной температуры. Структурный анализ стеклокерамики показал, что  $Yb_2O_3$ ,  $Tm_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  и  $Nb_2O_5$  играют роль нуклеаторов объемной кристаллизации основной фазы – твердых растворов со структурой  $\beta$ -кварца и  $\beta$ -

сподумена. Термообработка при температурах  $T > 750^\circ C$  приводит к объемной кристаллизации тетрагональной шеелитоподобной Т-фазы  $Ho:YNbO_4$ , а при увеличении температуры до  $900^\circ C$  в рентгенограммах наблюдаются пики, относящиеся к моноклинной М-фазе  $Ho:YNbO_4$ . Данная структурная перестройка возникает в результате релаксации микронапряжений в Т-фазе наноразмерных кристаллов  $YNbO_4$ , в которой искаженная моноклинная ячейка оказывается энергетически более выгодной.

Полученные образцы (при вторичной термообработке при  $T < 1000^\circ C$ ) были прозрачны и имели желтоватый оттенок, связанный с рассеянием света на неоднородностях, возникающих при кристаллизации основной фазы стеклокерамики, и с электронными переходами  $[NbO_4]^{3-}$ . Для спектроскопических исследований был изготовлен ряд прозрачных отполированных пластинок толщиной  $\sim 2$  мм.

На рисунках 2-4 приведены спектры оптического поглощения исходного и термообработанных образцов стеклокерамики. В области прозрачности оптической матрицы наблюдаются полосы, связанные с переходами иона  $Ho^{3+}$  из основного состояния  $^5I_8$  в более высокоэнергетические. На рисунках приведена интерпретация переходов (отмечены конечные возбужденные состояния ионов  $Ho^{3+}$ , в соответствии с [3]). При формировании М- и Т-фазы полосы существенно структурируются в результате частичного снятия неоднородного уширения при координации ионов  $Ho^{3+}$  в  $YNbO_4$ .

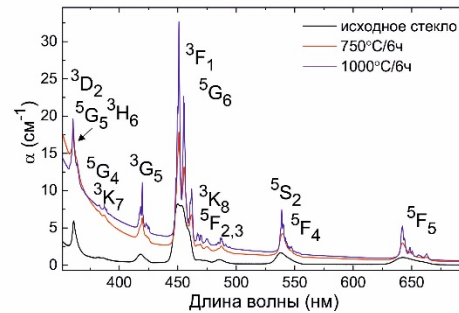


Рисунок 2 – Спектры оптического поглощения исходного стекла и стеклокерамики

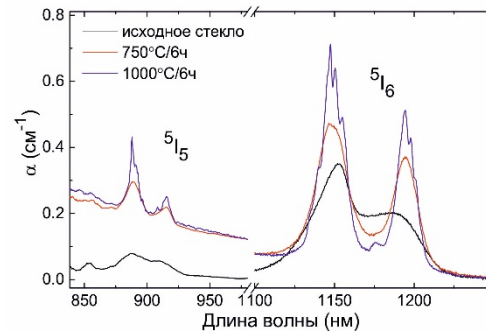


Рисунок 3 – Спектры оптического поглощения исходного и термообработанного стекла

Для определения вероятностных характеристик переходов было проведено моделирование наблюдаемых переходов в спектрах в рамках модели Джадда-Оффельта. В процедуре уточнения было задействовано 10 независимых переходов  $\text{Ho}^{3+}$ . Для исходного стекла параметры интенсивности составляют  $\Omega_2 = 8.100$ ,  $\Omega_4 = 2.773$  и  $\Omega_6 = 1.006 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-20}$ . Существенная величина параметра  $\Omega_2$  (относительно других стеклянных матриц) может свидетельствовать о низкосимметричной координации  $\text{Ho}^{3+}$  в исходном стекле. В стеклокерамике, подвергшейся обработке при  $T = 750 \text{ C}$  параметры Джадда-Оффельта  $\Omega_2 = 8.360$ ,  $\Omega_4 = 4.258$  и  $\Omega_6 = 1.240 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-20}$  несущественно отклонены от значений, полученных в случае исходного стекла. Это, вероятно, связано с близостью координационного окружения иона  $\text{Ho}^{3+}$  в аморфной стекломассе и в разупорядоченной тетрагональной шеелитоподобной фазе  $\text{YNbO}_4$ . Меньшее отношение  $\Omega_2/\Omega_4$  говорит о несколько более высокосимметричной координации  $\text{Ho}^{3+}$  (что согласуется с предполагаемой симметрией позиции,  $S_4$ ). При кристаллизации моноклинной фазы параметры интенсивности существенно изменяются:  $\Omega_2 = 10.608$ ,  $\Omega_4 = 5.019$  и  $\Omega_6 = 1.124 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-20}$ . Это приводит к увеличению вероятностей радиационных переходов  $A_{JJ}$ . Вероятностные характеристики наиболее интенсивных переходов в испускании для моноклинной фазы  $\text{Ho}^{3+}:\text{YNbO}_4$  приведены в таблице 1.

В целом, полученные результаты хорошо согласуются со структурными преобразованиями, протекающими в стеклокерамике в процессе ее синтеза. Дальнейшие исследования будут направлены на определение возможности коактивации стеклокерамики ионами  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  и оценке перспектив данных материалов как лазерных активных сред и люминофоров.

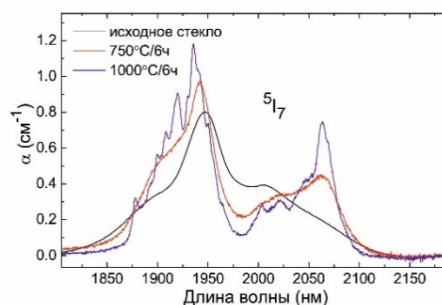


Рисунок 4 – Спектры оптического поглощения исходного и термообработанного стекла

Таблица 1 – Вероятности излучательных переходов ионов  $\text{Ho}^{3+}$  М-фазе  $\text{Ho}^{3+}:\text{YNbO}_4$

| Переход                   | $A_{JJ}, \text{с}^{-1}$                   | $\tau_{\text{rad}}, \text{нс}$ |
|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | $43.315^{\text{ED}} + 15.358^{\text{MD}}$ | 17.044                         |
| $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$ | $12.761^{\text{ED}} + 7.808^{\text{MD}}$  | 8.476                          |
| $^5I_6 \rightarrow ^5I_8$ | $97.410^{\text{ED}}$                      |                                |
| $^5I_5 \rightarrow ^5I_7$ | $45.684^{\text{ED}}$                      | 10.625                         |
| $^5I_5 \rightarrow ^5I_8$ | $38.254^{\text{ED}}$                      |                                |
| $^5I_4 \rightarrow ^5I_6$ | $19.260^{\text{ED}}$                      | 19.656                         |
| $^5I_4 \rightarrow ^5I_7$ | $22.111^{\text{ED}}$                      |                                |
| $^5F_5 \rightarrow ^5I_6$ | $72.547^{\text{ED}}$                      | 0.467                          |
| $^5F_5 \rightarrow ^5I_7$ | $457.972^{\text{ED}}$                     |                                |
| $^5F_5 \rightarrow ^5I_8$ | $1847.0^{\text{ED}}$                      |                                |

#### Литература

1. Sarin P. [et.al.], «High Temperature Properties and Ferroelastic Phase Transitions in Rare Earth Niobates ( $\text{LnNbO}_4$ )» // J. Am. Cer. Soc. – 2014 – Vol. 10., p. 3307–3319.
2. Loiko P.A. [et.al.]. Transparent glass-ceramics with ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ):  $\text{YNbO}_4$  nanocrystals: crystallization, structure, optical spectroscopy and cooperative upconversion / J. Lum. – 2016 – Vol. 179, p. 64–73.
3. Walsh B.M. [et.al.] «Energy levels and intensity parameters of  $\text{Ho}^{3+}$  ions in  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  and  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ » // J. Phys. Chem. Sol. – 2006 – Vol. 67, No. 7., p. 1567–82.

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

### СПЕКТРАЛЬНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ ЛИТИЕВОАЛЮМОГАЛЛИЕВОЙ ШПИНЕЛИ С ИОНАМИ КОБАЛЬТА

Глазунов И.В.<sup>1</sup>, Скопцов Н.А.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>1,3</sup>, Маляревич А.М.<sup>1</sup>, Юмашев К.В.<sup>1</sup>, Дымшиц О.С.<sup>2</sup>, Жилин А.А.<sup>2</sup>, Алексеева И.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Государственный Оптический Институт им С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Российская Федерация  
<sup>3</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Источники лазерного излучения наносекундной длительности в условно безопасной для глаз области спектра около 1.5 мкм применяются в медицине, системах оптической связи и локации, дальнометрии, оптическом дистанционном зондировании поверхности Земли. С момента реализации в середине 60-х годов режима пассивной модуляции добротности лазера на рубине фталоцианино-

выми красителями применение насыщающихся поглотителей в лазерах является одним из главных способов генерации импульсов света нано- и субнаносекундной длительности [1-6].

Ситалл на основе наноразмерных кристаллов шпинели  $\text{Li}(\text{Al,Ga})_5\text{O}_8$ , активированной ионами  $\text{Co}^{2+}$ , которые находятся в кристаллах в тетракоординированных позициях, является новым материа-

лом, интересным для исследований. Ситалл предполагается использовать, как пассивный затвор для лазеров спектрального диапазона 1.4-1.7 мкм

Исходное стекло литиевоалюмосиликатной системы было синтезировано из реактивов квалификации ОСЧ в кварцевом тигле при температуре 1580 °С с принудительной гомогенизацией расплава, отлито на холодную металлическую плиту и отожжено при 620 °С. Для получения прозрачного ситалла с наноразмерными кристаллами литиевоалюмогаллиевой шпинели исходное стекло было термообработано при 750 °С. Рентгенограмма полученного ситалла представлена на рисунке 1.

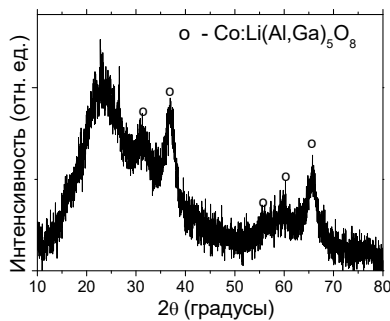


Рисунок 1 – Рентгенограмма ситалла с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Li}(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_8$

На рисунке 2 показан спектр поглощения образца, который был зарегистрирован спектрофотометром Cary Varian 5000. Анализ спектра показывает, что в состав нанокристаллов входят двухвалентные тетракоординированные ионы кобальта. В кристаллах и ситаллах ионы  $\text{Co}^{2+}$  (рисунок 1) имеют полосы поглощения в видимой области ( $\approx 0.6$  мкм) и в ближней ИК области (1.1–1.8 мкм) [7]. В спектре видно, что край полосы поглощения ионов кобальта, вызванный переходами  ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{F})$ , в ситалле находится в области 1.70 мкм, что возможно для материалов с ионами кобальта и галлия [1]. Указанная особенность является первоначальным подтверждением возможности использования данного материала в качестве пассивного затвора в лазерах, излучающих в спектральном диапазоне 1.4-1.7 мкм.

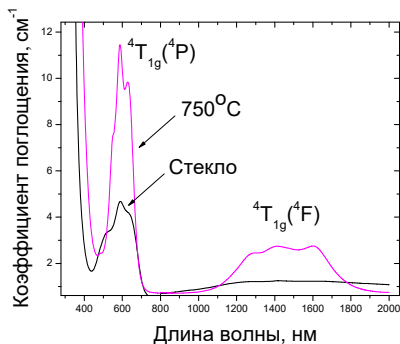


Рисунок 2 – Спектр поглощения ионов кобальта в стекле и ситалле с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Li}(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_8$

На рисунке 3 представлен спектр люминесценции ситалла с ионами кобальта. Возбуждение осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 623 нм, регистрация производилась спектрометром SOLAR S-100. Полосы свечения обусловлены переходами ионов кобальта  $\text{Co}^{2+}$  из возбужденного состояния  ${}^4\text{A}_{2g}({}^4\text{F})$  (0.6 мкм) и  ${}^4\text{T}_{2g}({}^4\text{F})$  (0.9 мкм) в основное состояние  ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F})$ .

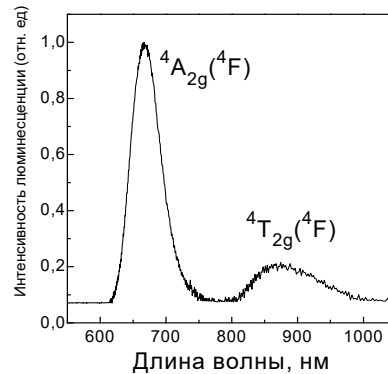


Рисунок 3 – Спектр люминесценции ионов кобальта в ситалле с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Li}(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_8$

Исследована зависимость пропускания ситаллов от интенсивности падающего лазерного излучения. Образец толщиной 2,45 мм облучался лазерными импульсами с энергией до 3 мДж, длительностью 87 нс на длине волны 1540 нм. Диаметр сфокусированного пятна на образце составлял 94 мкм.

Для обработки экспериментальных данных, которые показывают, что ситалл с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Li}(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_8$ , просветляется, используется модель медленно релаксирующего насыщающегося поглотителя [2]:

$$\frac{dE_0}{dz} = -I_{sa} \cdot \frac{\ln(1/T_0)}{L} \cdot \left[ (1-\gamma) \cdot (1 - e^{-\frac{E_0}{I_{sa}}}) + \gamma \cdot \frac{E_0}{I_{sa}} \right],$$

где  $I_{sa} = h\nu/\sigma_a$  – интенсивность насыщения поглощения;  $\gamma = \sigma_{esa}/\sigma_a$  – контраст просветления;  $\sigma_a$  и  $\sigma_{esa}$  – поперечные сечения поглощения из основного и возбужденного состояний, соответственно. По результатам моделирования определены контраст просветления  $\gamma = 0.38$ , а плотность энергии насыщения составляет  $F_s = 4$  Дж/см<sup>2</sup>

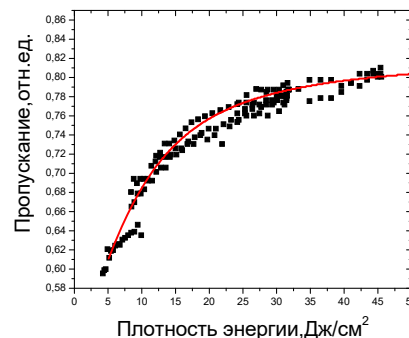


Рисунок 4 – Просветление ситалла с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Li}(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_8$  под действием лазерного излучения

Таким образом, в работе показано, что синтезирован новый лазерный материал – ситалл на основе наноразмерных кристаллов шпинели  $\text{Li}(\text{Al,Ga})_5\text{O}_8$ , активированной ионами  $\text{Co}^{2+}$ . Исследованы его спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства.

Полученные результаты дают основания для проведения исследований по получению пассивной модуляции добротности для лазеров спектрального диапазона 1,4–1,7 мкм.

*О.Д. и А.Ж. выражают благодарность РФФИ, грант № 16-03-01130, за частичную поддержку работы.*

#### Литература:

1. P.A. Loiko, O.S. Dymshits, V.V. Vitkin, N.A. Skoptsov, A.A. Kharitonov, A.A. Zhilin, I.P. Alekseeva, S.S. Zapalova, A.M. Malyarevich, I.V. Glazunov, K.V. Yumashev «Glass-ceramics with  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ :  $\text{Co}^{2+}$  nanocrystals: Saturable absorber for 1.5–1.7  $\mu\text{m}$  Er lasers», *Laser Physics Letters* Vol. 12 (2015) 035803.
2. Denisov I.A., Demchuk M.I., Kuleshov N.V., Yumashev K.V.  $\text{Co}^{2+}:\text{LiGa}_5\text{O}_8$  saturable absorber passive Q-switch for 1.34  $\mu\text{m}$   $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  and 1.54

$\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{glass lasers}$ . *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2455–2457 (2000).

3. Konstantin V. Yumashev, «Saturable absorber  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal for Q switching of 1.34- $\mu\text{m}$   $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  and 1.54- $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{glass lasers}$ », *Appl. Opt.* **38**, 6343–6346 (1999).

4. K.V. Yumashev, I.A. Denisov, N.N. Posnov, P.V. Prokoshin, V.P. Mikhailov. Nonlinear absorption properties of  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal. *Appl. Phys. B* **70**, 179–184 (2000).

5. John B. Gruber, Ann W. Kennedy, Bahram Zandi and James A. Hutchinson «Modeling of the  $\text{Co}^{2+}$  saturable absorber Q-switch for the  $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass laser}$  (1.534  $\mu\text{m}$ )», *Proc. SPIE* 3928, Nonlinear Materials, Devices, and Applications, 142 (2000).

6. Alexander M. Malyarevich, Igor A. Denisov, Konstantin V. Yumashev, Olga S. Dymshits, Alexander A. Zhilin, and Uk Kang, «Cobalt-doped transparent glass ceramic as a saturable absorber Q switch for erbium:glass lasers», *Appl. Opt.* 2001, **40**, 4322–4325.

7. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. Excited state absorption and passive Q-switch performance of  $\text{Co}^{2+}$ -doped oxide crystals // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol. 341, № 1–2. – P. 366–370.

УДК 621.372.821.1

### РОСТ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ДВОЙНОГО ВОЛЬФРАМАТА С ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ Дернович О.П.<sup>1</sup>, Курильчик С.В.<sup>2</sup>, Вилейшикова Е.В.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Кравцов А.В.<sup>3</sup>, Гурецкий С.А.<sup>3</sup>, Колесова И.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, United Kingdom

<sup>3</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь

Лазерное излучение с длиной волны в спектральной области двух микрометров требуется для дистанционного зондирования земли, медицинских применений, обработки материалов, в качестве источника возбуждения оптических параметрических генераторов [1–3]. В твердотельных лазерах, активная среда которых легирована ионами редкоземельных элементов, для генерации в области 2 мкм используются активирующие ионы тулия и гольмия. Материалы, легированные ионами тулия, могут накачиваться широко распространенными лазерными диодами на основе  $\text{AlGaAs}$ , излучающими в области 800 нм. При этом благодаря эффективному процессу кросс-релаксации квантовая эффективность накачки приближается к двум [4]. Кроме того, широкая полоса испускания позволяет реализовывать непрерывную перестройку длины волны генерации в диапазоне ~ 200 нм [5]. Однако поперечные сечения переходов иона тулия сравнительно невелики. Ионы гольмия характеризуются большими сечениями поглощения и испускания, но полоса поглощения, подходящая для накачки, расположена в области

1,9 мкм, в которой отсутствуют доступные лазерные диоды. Чтобы применять диодную накачку гольмиевых сред, в них вводят ионы тулия в качестве сенсibilизатора. Однако процессы апконверсии и обратного переноса энергии от ионов гольмия к ионам тулия при высоких значениях накачки приводят к большой тепловой нагрузке в материале и невысоким средним мощностям.

Еще одним решением является схема, в которой тулиевый лазер с диодной накачкой, генерирующий в спектральной области около 1,95 мкм, используется для накачки лазера, активный элемент которого легирован ионами гольмия. В этом случае отсутствуют потери на обратный перенос энергии, наблюдается низкая вероятность апконверсионных процессов и малые стоксовые потери, т. к. длина волны генерации близка к длине волны возбуждения.

В данной работе нами исследуется монокристаллический слой калиевого вольфрамата сложного состава, легированный трехвалентными ионами гольмия, для применения его в качестве



активного элемента волноводного лазера в условиях резонансной лазерной накачки.

В качестве активной среды волноводных планарных лазеров выступает тонкий слой активного вещества с более высоким показателем преломления по сравнению с окружающим его материалом. Это позволяет локализовать излучение накачки и генерации в узкой пространственной области размером несколько десятков или сотен мкм на протяжении всей длины волновода, что приводит к высокой пространственной согласованности мод резонатора и накачки. Что в свою очередь обеспечивает высокие коэффициенты усиления, низкие пороги генерации и большую устойчивость к термическим эффектам. Активные волноводные структуры позволяют создавать интегральные оптические системы для обработки информации.

Рост монокристаллического слоя калий-иттриевого вольфрамата, солегированного оптически инертными ионами гадолиния и иттербия (в условиях резонансной накачки) и активным ионом гольмия, производился методом жидкофазной эпитаксии на подложке кристалла  $KY(WO_4)_2$ , которая имела поперечные размеры  $10 \times 10$  мм и толщину в направлении кристаллографической оси  $b$  2 мм. Процесс кристаллизации в методе жидкофазной эпитаксии осуществляется за счёт пересыщения раствора-расплава вблизи границы раздела в центральной приповерхностной зоне. Рост производился при температуре  $900-920^\circ\text{C}$  и скорости вращения подложки 30-40 оборотов в минуту. Раствор-расплав нагревался в тигле выше температуры насыщения на  $30-50^\circ$  и проводилась гомогенизация в течение 12 часов. Далее температура опускалась до температуры на  $1,5-2,5^\circ\text{C}$  ниже температуры насыщения и проводился рост плёнки до получения заданной толщины.

Полученный образец был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла  $N_m$  и  $N_g$  и отполирован до толщины слоя 140 мкм (вдоль кристаллографической оси  $b$ ). Фотография торца слоя, сделанная через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО) с помощью CCD камеры, представлена на рисунке 1. Выращенный слой характеризуется отсутствием неоднородностей, трещин и существенных дефектов.



Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя, активированного ионами гольмия, выращенного на кристалле  $KY(WO_4)_2$

Рентгеноструктурный анализ эпитаксиального слоя, который был проведен на дифрактометре Bruker D2 Phaser, подтвердил высокое структурное качество слоя. Так как исследовался объемный ориентированный образец, в дифрактограмме, которая приведена на рисунке 2, присутствуют только рефлексы, относящиеся к дифракции от плоскостей  $(0k0)$ . Определенный по ним параметр  $b$  кристаллической решетки слоя равняется  $10,341 \text{ \AA}$  и рассогласованность с параметром  $b$  подложки составила  $0,009\%$ . Данное значение на порядок превышает допустимый предел, позволяющий растить слои свободные от трещин [6].

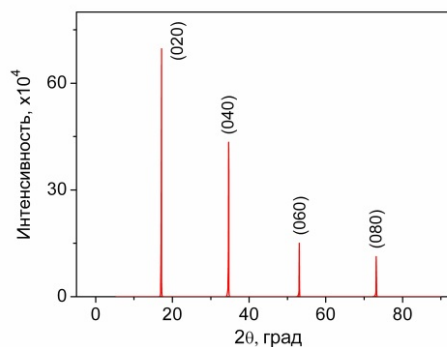


Рисунок 2 – Дифрактограмма монокристаллического слоя  $Ho(4.97 \text{ ат}\%):KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии было определено содержание редкоземельных элементов в эпитаксиальном слое. Концентрация ионов гольмия  $Ho^{3+}$  составила  $4,97 \text{ ат}\%$ , а стехиометрическая формула состава –  $Ho:KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$ .

На фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker) был зарегистрирован спектр поглощения образца, измеренный со спектральным разрешением  $1 \text{ см}^{-1}$  в спектральном диапазоне  $1800-2200 \text{ нм}$  для излучения, поляризованного вдоль осей оптической индикатрисы  $N_m$  и  $N_g$ , который представлен на рисунке 3. Полученный спектр поглощения характеризуется существенной анизотропией для излучения различных поляризаций и идентичен спектру объемного кристалла [7].

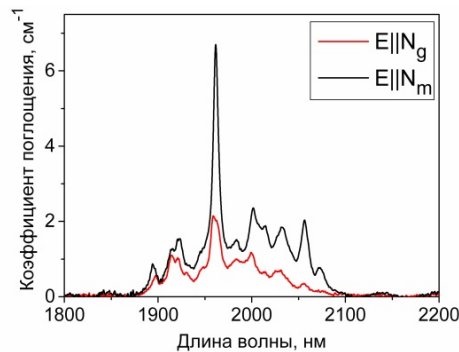


Рисунок 3 – Спектр поглощения монокристаллического слоя  $Ho(4.97 \text{ ат}\%):KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$  в области  $2 \text{ мкм}$

Таким образом, методом жидкофазной эпитаксии получен образец слоя  $\text{KGd}_{0,0284}\text{Yb}_{0,0469}\text{Y}_{0,9247}(\text{WO}_4)_2$  с содержанием ионов  $\text{Ho}^{3+}$  4.97 ат.% толщиной 140 мкм, который характеризуется высоким оптическим и структурным качеством и может быть использован в качестве активной среды планарных волноводных лазеров, излучающих в спектральной диапозоне около 2 мкм.

### Литература

1. Walsh, B.M. Review of Tm and Ho Materials; Spectroscopy and Lasers / B.M. Walsh // *Laser Physics*. – 2009. – Vol. 19, No. 4. – PP. 855–866.
2. Sorokina, I.T. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources / I.T. Sorokina, K.L. Vodopyanov. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – P. 558.
3. Godart, A. Infrared (2–12  $\mu\text{m}$ ) solid-state laser sources: a review / A. Godard // *Comptes Rendus Physique*. – 2007. – Vol. 8. – P. 1100–1128.

4. Thulium doped monoclinic  $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ : growth and spectroscopy / O. Silvestre [et al.] // *Appl. Phys. B*. – 2007. – Vol. 87. – P. 707.

5. Перестраиваемый непрерывный лазер на кристалле  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с диодной накачкой / О.П. Дернович [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 8-ой Междунар. студенческой науч.-технич. конф., Минск, 22–24 апреля 2015 г. / пред. редкол. Гусев О.К. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 197.

6. Engineering lattice matching, doping level, and optical properties of  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2:\text{Gd}$ ,  $\text{Lu}$ ,  $\text{Yb}$  layers for a cladding-side-pumped channel waveguide laser / S. Aravazhi [et al.] // *Appl. Phys. B*. – 2013. – Vol. 111. – P. 433–446.

7. Growth, spectroscopy and laser operation of  $\text{Ho}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  / V. Lambunathan [et al.] // *Journal of Luminescence*. – 2016. – Vol. 179. – P. 50–58.

УДК 621.373.826

### Yb:YAB BASED CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER

V.E. Kisel,<sup>1</sup> A.S. Rudenkov,<sup>1</sup> K.N. Gorbachenya<sup>1</sup>, V.V. Maltsev<sup>2</sup>, N.I. Leonyuk<sup>2</sup>, and N.V. Kuleshov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Department of Crystallography and Crystal Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia

#### 1. Introduction

Diode-pumped femtosecond laser sources with pulse repetition rates of hundreds kHz and pulse energies of tens microjoules are of practical importance for high-precision micromachining in industry and biomedicine [1].

These pulse trains can be generated conveniently with RA systems based on bulk regenerative amplifiers. One of the highest output power reported so far for bulk RAs is 28 W in an Yb:CALGO operating at 500 kHz, with 217 fs pulses [2]. The output power of about 21 W at 200 kHz PRF with 200 fs pulse duration is obtained on Yb:KGW dual crystal system [3]. Generalizing the above data, we can conclude that the search for new laser media with appropriate spectroscopic properties for regenerative amplification of ultrashort laser pulse is still of high interest.

Yb:YAB crystal demonstrate promising spectroscopic properties that confirmed by excellent experimental results in mode-locked lasers provided near-transform limited pulses with wide spectra [4].

In our paper we present the experimental results of Yb:YAB-based chirped pulse regenerative amplifier for the first time to the best of our knowledge.

#### 2. Experimental layout

The conceptual scheme of the system layout is shown in Fig. 1. As a seed laser diode-pumped Yb:KYW oscillator was used which provided 100 fs pulse train with 70 MHz PRF and 10 nJ single pulse energy. The seed pulse spectrum was 12 nm wide (FWHM) and centered at 1037.7 nm. A BaB2O4 (BBO)-based pulse-picker was used to reduce pulse

repetition frequency to the levels of 1–100 kHz. For stretching the pulse Martinez-scheme stretcher based on the reflection Au-coated grating was used with period of 1800  $\text{mm}^{-1}$ .

The stretched seed pulse duration was about 150 ps. After passing through a Faraday isolator, the seed pulse was injected into the RA. The isolator was employed to protect the seeder from high-intensity back reflections and, at the same time, for separating the amplified output pulse from the seed oscillator.

A grating compressor is employed at the RA output in order to compress the chirped femtosecond pulse. Compressor consists of two reflection Au-coated grating with period of 1700  $\text{mm}^{-1}$ . Transmission of the compressor was about 76 %.

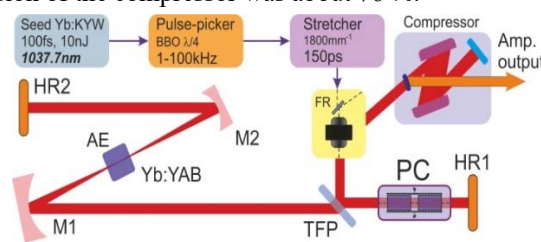


Fig. 1. Schematic of the Yb:YAB chirped pulse regenerative amplifier

As a pump source a multiple single emitter InGaAs fiber coupled laser diode ( $\text{Ø}105 \mu\text{m}$ ,  $\text{NA}=0.15$ ) with maximum output power of about 25 W was used. The pump light was formed by set of lenses into the spot with diameter of about 180  $\mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ). The losses on transmission of the

hole from such "pump" mirror did not exceed 3 % of pump power. Besides that such pumping scheme enable us to tune the wavelength of the laser diode exactly in the absorption band of the material without losses in the short-wave pass filter (input mirror). One of the important things most notably for regenerative amplifiers with longitudinal pumping schemes is that the part of the intracavity pulse energy passes through the input mirror and damages pumping diode. Our pumping scheme is free of these negative issues.

In Fig. 2 the pump beam profiles during the propagation through the gain crystal are depicted. As can be seen the pump beam profile was a circular and homogeneous inside the crystal. The drop in the middle of the pump beam profile appears at the distances >3mm from pump beam waist and therefore do not introduce any negative influence due to the pumping inhomogeneity on the mode-matching and output laser performance.

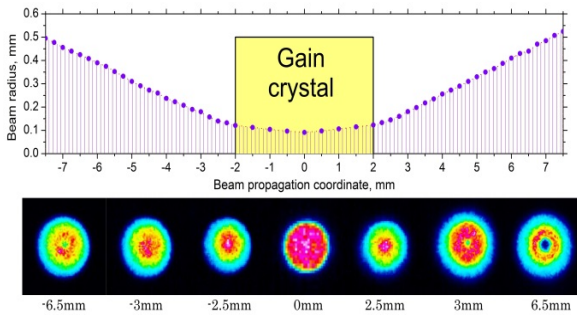


Fig. 2. Beam radius and pump beam profiles during the propagation through the cavity and gain crystal

### 3. Chirped pulse regenerative amplifier performance

During the RA experiment we measured the output pulse train parameters for  $\sigma$ -polarized light in the gain medium at 100 kHz PRF. The dependencies of average output power and pulse duration on cavity round trip number for Yb:YAB regenerative amplifier system (compressor transmission was about 76 %) are presented in Fig. 3.

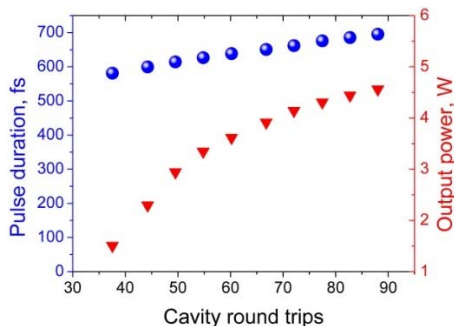


Fig. 3. Dependencies of average output power and pulse duration on cavity round trip number

The maximum average output power of 4.6 W was obtained. On increasing the cavity round trips

number from 37 to 88 pulse duration increases slightly from 581 fs to 695 fs. The dependency of amplified pulse peak power on cavity round trips number are shown Fig. 4.

Maximum pulse peak power was about 66 MW at 100 kHz repetition frequency. Spectrum of the amplified pulses at the highest output power are shown in Fig. 5.

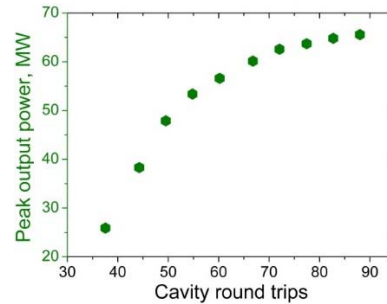


Fig. 4. The dependency of amplified pulse peak power on cavity round trips number

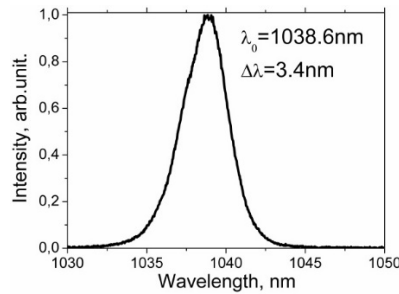


Fig. 5. Spectrum of amplified pulses at highest output power

Autocorrelation trace of the amplified pulses at the highest output power is shown in Fig. 6. Measured pulse duration was about 695 fs assuming Gaussian pulse shape.

In conclusion, the results of experimental investigation of Yb:YAB-based chirped pulse RA are reported for the first time to our knowledge. It generates as high as 4.6 W of average output power with 695 fs compressed pulses and 66 MW peak power at 100 kHz repetition rate.

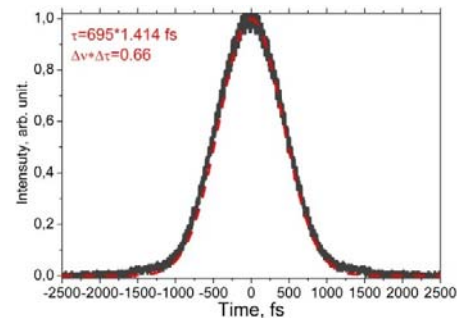


Fig. 6. Autocorrelation trace of the amplified pulses at the highest output power.

**References**

1. D. Breitling, C. Föhl, F. Dausinger, T. Kononenko, and V. Konov, in *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*, F. Dausinger, F. Lichtner and H. Lubatschowski, eds. (Springer, Berlin, 2004).  
 2. E. Caracciolo et.al., «28-W, 217 fs solid-state Yb:CaIGdO<sub>4</sub> regenerative amplifiers», *Opt. Lett.* 38, 4131-4133 (2013).  
 3. G.H. Kim et.al., «A high brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier based on a dual-crystal Yb:KGW laser», *Laser Phys. Lett.* 10 (2013) 125004 (5pp).  
 4. 223. High power CW and mode-locked laser performance of Yb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, K.N. Gorbachenya, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // 18th

Conference on Laser Optics : technical program, St. Petersburg, Russia, 4–8 June 2018. – P. WeR1-25.  
 5. P. Sévillano et.al., «32-fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> oscillator optically pumped by a bright fiber laser», *Opt. Lett.* 39, 6001–6004 (2014).  
 6. V.E. Kisel et. al., «High-power, efficient, semiconductor saturable absorber mode-locked Yb:KGW bulk laser», *Opt. Lett.* 40, 2707–2710 (2015).  
 7. A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, and N. Kuleshov, «Yb<sup>3+</sup>:CaYAlO<sub>4</sub>-based chirped pulse regenerative amplifier», *Opt. Lett.* 41, 2249–2252 (2016).  
 8. A. Rudenkov, V. Kisel, V. Matrosov, and N. Kuleshov, «200 kHz 5.5 W Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>-based chirped-pulse regenerative amplifier», *Opt. Lett.* 40, 3352-3355 (2015).

УДК 681.7 (075.8)

**МЕТОД ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКИ ДЛЯ ГАБАРИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ**  
**Артюхина Н.К.<sup>1</sup>, Чернавцич Д.А.<sup>1</sup>, Самбрано Л.Ф.<sup>1</sup>, Клочко Т.Р.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

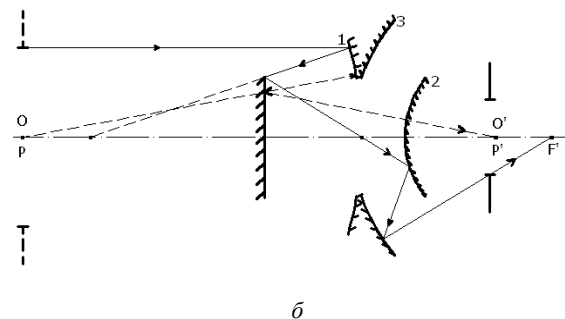
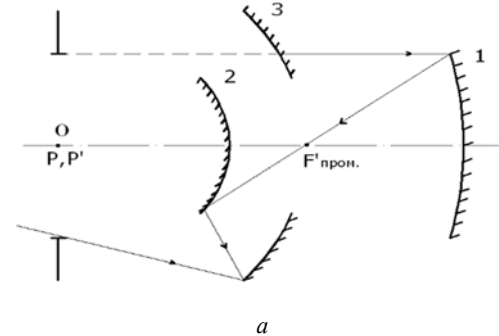
Зеркальные системы широко используются в оптическом приборостроении. Они не имеют хроматических aberrаций для любых апертур и фокусных расстояний. Достоинства зеркальных систем: высокое разрешение в широком оптическом спектральном диапазоне; отсутствие селективной непрозрачности и ограничений по апертуре, связанных с размерами заготовок; небольшие габариты, меньшая длина, чем в линзовых и зеркально-линзовых ОС, выигрыш по весу (особенно для объективов диаметрами больше 200 мм); а также экономичность материалов, подтверждают актуальность проблемы моделирования и разработки зеркальных систем.

В связи с расширением диапазона длин волн спектра в ИК и УФ областях оптико-электронных приборов широкое распространение получила группа чисто зеркальных оптических систем (ОС). Такие системы достаточно компактны; при сравнительно несложной конструкции можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической aberrации и меридиональной комы.

Одно из направлений в вычислительной оптике – постоянный поиск новых схем с улучшенными характеристиками. Это определяется интенсивным развитием оптической отрасли, развитием новых технологий и исследований.

В данной работе рассматривается новый метод, основанный на зеркальной развертке оптической системы. С помощью этого метода можно решить большинство проблем, возникающих при габаритном моделировании и параметрическом расчете зеркальных объективов.

Метод основан на теоретических положениях, приведенных в работе [1]. С использованием метода было получено ранее новое схемное решение зеркального концентрического объектива [2]. На рисунке 1, а приведена конструкция объектива, состоящая из трех концентрических зеркал (базовая схема).



а – схематический чертеж; б – схема с плоским зеркалом

Рисунок 1 – Зеркальный концентрический объектив

Этот объектив представляет собой развертку альтернативной схемы с плоским зеркалом (рисунок 1, б), которая обладает рядом преимуществ по сравнению с базовой [3]:

- 1) для исправления сферической aberrации меняют увеличение второй ступени объектива, а также соотношения радиусов поверхностей;
- 2) кривизна поля отрицательна, поверхность изображения представляет собой правильную сферу, радиус кривизны которой равен фокусному расстоянию объектива (влияние кривизны компенсируют, применяя сферические фотопластинки или сферический приемник);
- 3) в схеме есть промежуточный действительный фокус, что дает прямое изображение вне системы.

Недостатком данной системы является только большая длина. При введении в схему ОС дополнительного компонента (плоского зеркала) происходит изменение положения зрачков, выходной зрачок оказывается мнимым (изначально зрачки совпадают с центром кривизны concentрических зеркал).

Плоское поле изображения получено в базовой системе, представленной на рисунке 2 (одно из зеркал имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей).

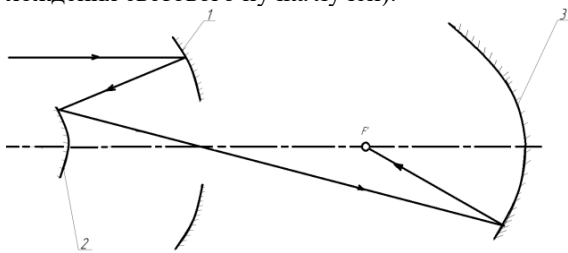


Рисунок 2 – Схемное решение трехзеркального объектива с промежуточным изображением

Аналогичное использование метода зеркальной развертки привело к созданию компактного план-анастигмата, его схема использует зеркальный компонент – двойное зеркало, объединяющий первую и четвертую отражающие поверхности, так называемый линзовый монолит (рисунок 3).

Расчитана альтернативная схема. Система имеет промежуточное изображение. В системах с промежуточным изображением асферические зеркала имеют более технологичную форму и проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света. Четыре aberrации 3-го порядка устранены за счет достаточного числа коррекционных параметров.

Отличие метода расчета состоит в том, что при  $\alpha_3 \neq 0$  параметр  $d_2$  нельзя использовать для компенсации aberrаций: все значения толщин  $d_5$  (в том числе и  $d_2$ ) определены при известных значениях углов  $\alpha_s$  и высот  $h_s$ , но зато появляется дополнительный параметр  $h_3 \neq h_2$ . Самым лучшим решением, определяющим схему с минимальным числом коэффициентов асферики,

является нахождение математических зависимостей между углами  $\alpha_s$  без появления дробных степеней. Для расчета конструктивных параметров использован комбинированный метод расчета.

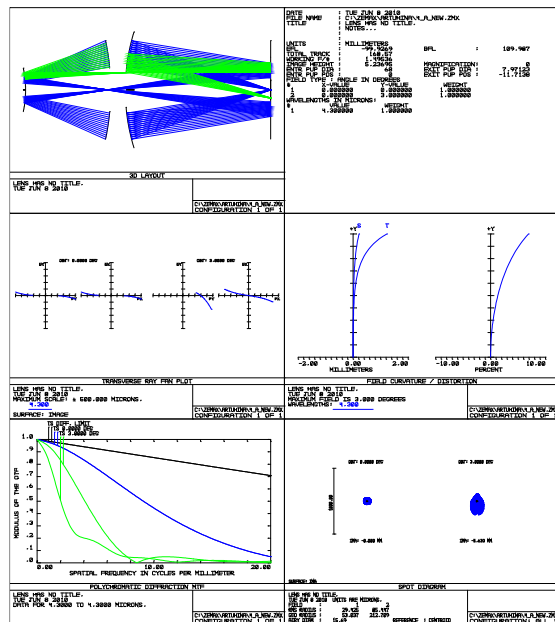


Рисунок 3 – Аберрационная оценка качества изображения объектива план-анастигмата ( $f' = 100$  мм;  $D/f' = 1 : 1,5$ ;  $2\omega = 6^\circ$ )

Трехзеркальные схемы с промежуточным изображением, полученные традиционными методами имеют откорректированные значения комы, сферической aberrации и астигматизма за счет придания асферической формы всем поверхностям зеркал, но из-за чрезмерно высоких относительных отверстий зеркал (порядка 1:0,3) системы технологически не осуществимы и не может обладать хорошими оптическими характеристиками: поле зрения  $2\omega$  получается очень малым из-за ограниченных размеров центрального отверстия в выпуклом зеркале. Анализ таких систем приведен в статье [4].

### Литература

1. Чуриловский, В.Н. Теория хроматизма и aberrаций 3-го порядка / В.Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1968. – 312 с.
2. Артюхина Н.К. Патент РБ № 17403 на изобретение «Зеркальный объектив», 2013, Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы, 2013. – № 4. – С. 165.
3. Артюхина Н.К. Патент РБ № 20856 на изобретение С1. Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы, 2017. – № 1. – С. 123.
4. Артюхина Н.К., Тульева Н.Н. Трехзеркальный длиннофокусный объектив-анастигмат. Вести НАН РБ. Серия физико-технических наук, 2010. – № 4. – С. 93–99.

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

**ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ Er:YAG С ЗАТВОРОМ ИЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОКРИСТАЛЛЫ  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$**

Скопцов Н.А.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>1,2</sup>, Юмашев К.В.<sup>1</sup>,  
Yang Shi<sup>3</sup>, Chunqing Gao<sup>3</sup>, Qing Ye<sup>3</sup>, Shuo Wang<sup>3</sup>, Qing Wang<sup>3</sup>, Mingwei Gao<sup>3</sup>,  
Дымшиц О.С.<sup>4</sup>, Жилин А.А.<sup>4</sup>, Запалова С.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, 197101 Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, Republic of China

<sup>4</sup>Государственный Оптический Институт им С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Безопасные для глаз лазеры спектрального диапазона 1.5-1.6 мкм нашли широкое применение в дальнометрии, зондировании атмосферы, волоконных системах связи и других областях.

Лазеры, работающие в режиме пассивной модуляции добротности, позволяют получать сверхкороткие лазерные импульсы. Такие лазеры отличаются компактной конструкцией, проще в производстве и эксплуатации, обладают более низкой стоимостью по сравнению с системами с активной модуляцией добротности.

В настоящей работе мы представляем результаты исследования режима пассивной модуляции добротности лазера на основе монокристалла Er:YAG с резонансной накачкой волоконным лазером на длине волны 1532 нм. В качестве насыщающегося поглотителя использовался пассивный затвор на основе прозрачной стеклокерамики, содержащей нанокристаллы  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

Исходное стекло литиевогаллиевоаломо-силкатной системы состава  $13\text{Li}_2\text{O}\cdot 23\text{Ga}_2\text{O}_3\cdot 64\text{SiO}_2$  с добавкой оксида кобальта было синтезировано в тигле из кварцевой керамики при температуре 1580 °С с перемешиванием, отлито на металлическую плиту и отожжено при температуре 640 °С [1, 2]. Исходное стекло было термообработано при температуре 730 °С в течение 6 часов. В результате термообработки получен прозрачный материал светло-синего цвета. Результаты РФА (рисунок 1) показывают, что материал содержит кристаллы оксида галлия  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  нанометрового размера.

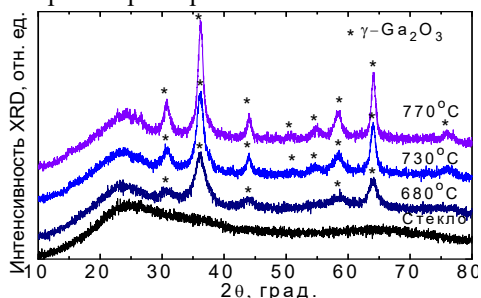


Рисунок 1 – Рентгенограмма ситаллов, содержащих нанокристаллы  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Спектры поглощения ситаллов, содержащих нанокристаллы  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$  (рисунок 2), измерены на спектрофотометре Cary Varian 5000. Из спектров видно, что край полосы по-

глощения ионов кобальта, вызванный переходами  $^4\text{A}_2(^4\text{F}) \rightarrow ^4\text{T}_1(^4\text{F})$ , в ситалле находится в области 1.75 мкм, что недоступно для других материалов, активированных ионами кобальта. Указанная особенность позволяет использовать данный материал как пассивный затвор в лазерах спектрального диапазона 1.4-1.75 мкм.

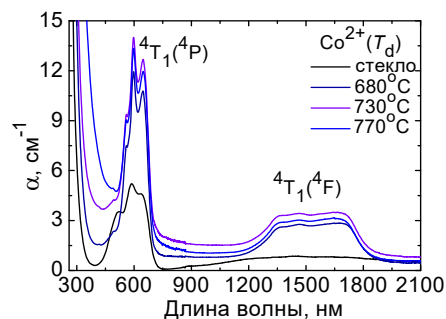


Рисунок 2 – Спектры поглощения ситаллов, содержащих нанокристаллы  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

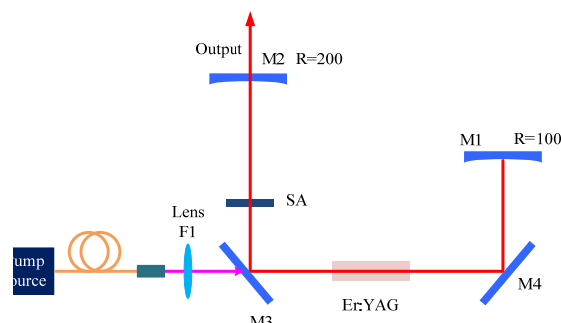


Рисунок 3 – Схема лазера на кристалле Er:YAG с пассивным затвором  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Схема лазера на кристалле Er:YAG с пассивным затвором  $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$  представлена на рисунке 3. Резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами. Длина резонатора составляет 285 мм. Зеркало M1 радиусом 100 мм глухое, пропускание (T) зеркала M2 радиусом 200 мм составляет 10 % или 22 % на длине волны генерации 1645 нм. Для предотвращения повреждения волоконного лазера накачки излучением твердотельного лазера Er:YAG, в резонатор поместили два промежуточных зеркала M3 и M4. Зеркала M3 и M4 обладают высоким T на длине волны накачки 1532 нм и высоким коэффициентом отражения на длине волны генерации лазера

1.6 мкм. Активной средой лазера является стержень Er:YAG диаметром 4 мм и длиной 40 мм. Концентрация ионов эрбия в кристалле составляет 0.25 ат.%. Источником накачки служит волоконный лазер мощностью 20.6 Вт (IPG Photonics, ELR-20) с длиной волны 1532 нм и спектральной шириной 0.2 нм. Пассивный затвор толщиной 470 мкм представляет собой полированную пластинку без покрытий. Радиус моды лазерного излучения в плоскости пассивного затвора составляет 270 мкм.

Был получен режим свободной генерации (без пассивного затвора). При использовании выходного зеркала с  $T = 10\%$  выходная мощность равна 5.35 Вт, с  $T = 22\%$  - 7.02 Вт на  $\lambda = 1645$  нм при мощности накачки 20.6 Вт.

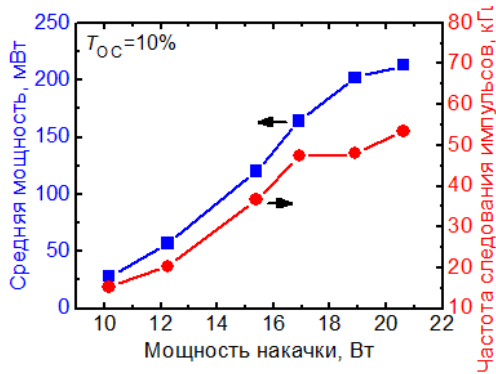


Рисунок 4 – Зависимость средней мощности и частоты следования импульсов лазера от мощности накачки

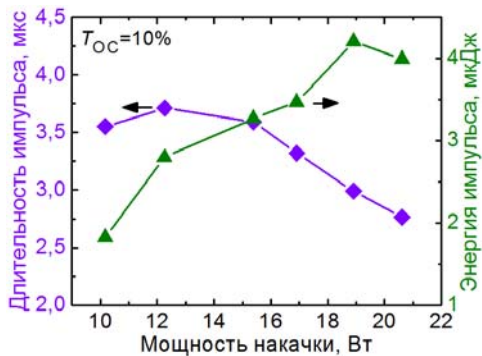


Рисунок 5 – Зависимость длительности и энергии импульса лазера от мощности накачки

При установке пассивного затвора в резонатор лазера был получен режим модуляции добротности (рисунки 4 и 5). Длина волны излучения лазера была измерена спектрометром Ocean Optics, NIR Quest-512. При использовании зеркала с  $T = 10\%$  наблюдалась конкуренция между двумя длинами волн, 1617 нм и 1645 нм. Для зеркала с  $T = 22\%$  наблюдалось только излучение с длиной волны 1645 нм.

Лазер на кристалле Er:YAG обладает высокими сечениями стимулированного испускания на длинах волн 1617 нм и 1645 нм, однако в данном кристалле наблюдается сильное перепоглощение, поэтому при высоких значениях инверсной населенности  $\beta > 0.35$  происходит переключение лазера на длину волны 1617 нм.

Выходные параметры лазера на кристалле Er:YAG при работе в режиме пассивной модуляции добротности при резонансной накачке мощностью 20.6 Вт представлены в таблице 1, где  $P_{av}$  – средняя мощность генерации лазера,  $E$  – энергия одиночного импульса,  $f$  – частота следования импульсов,  $t$  – длительность одиночного импульса.

Таблица 1

| T, % | $P_{av}$ , мВт | E, мкДж | f, кГц | t, мкс |
|------|----------------|---------|--------|--------|
| 10%  | 213            | 4       | 20.6   | 2.7    |
| 22%  | 273            | 5.6     | 48.12  | 3.6    |

Следует отметить, что при работе не наблюдалось разрушения пассивного затвора в лазере под действием лазерного излучения, что говорит о высоком пороге разрушения – не менее  $\sim 20 \pm 2$  Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, впервые изучена работа пассивного затвора на основе ситалла, содержащего нанокристаллы  $Co^{2+}:\gamma-Ga_2O_3$ , в лазере Er:YAG с резонансной накачкой, работающем на длине волны 1617 нм и 1645 нм. Получен режим пассивной модуляции добротности. Показано, что ситаллы с нанокристаллами оксида галлия  $Co^{2+}:\gamma-Ga_2O_3$  являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1.3-1.75 мкм.

Авторы выражают благодарность РФФИ, грант № 16-03-01130, за частичную поддержку работы.

### Литература:

1. P.A. Loiko, O.S. Dymshits, V.V. Vitkin, N.A. Skoptsov, A.A. Kharitonov, A.A. Zhilin, I.P. Alekseeva, S.S. Zapalova, A.M. Malyarevich, I.V. Glazunov, K.V. Yumashev «Glass-ceramics with  $\gamma-Ga_2O_3: Co^{2+}$  nanocrystals: Saturable absorber for 1.5–1.7  $\mu m$  Er lasers», Laser Phys. Lett. – 2015. – Vol. 12 – P. 035803.
2. Y. Shi, C. Gao, Q. Ye, S. Wang, Q. Wang, M. Gao, P. Loiko, N. Skoptsov, O. Dymshits, A. Zhilin, S. Zapalova, M. Tsenter, V. Vitkin, X. Mateos, K. Yumashev «Passively Q-switched 1.6  $\mu m$  Er:YAG laser with a  $\gamma-Ga_2O_3:Co$ -based glass-ceramics as a saturable absorber» Laser Phys. Lett. – 2018. – Vol. 15, No. 4. – P. 045004-1-5.

УДК 681.7.023.72

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ МЕЖДУ ЗАГОТОВКОЙ И ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКЕ ЛИНЗ**

**Филонова М.И.<sup>1</sup> Козерук А.С.<sup>1</sup>, Мальпика Л.Д.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университет Якамбу, Баркисимето, Венесуэла

В результате выполнения математического моделирования рабочей зоны станка для одновременной двусторонней абразивной обработки линз в условиях свободного притирания [1] представляется возможным определить критерии эффективного формообразования высокоточных оптических деталей, обеспечивающих наилучшие качественные и количественные показатели процесса. Особенностью математического моделирования рабочей зоны технологического оборудования для абразивной обработки оптических деталей, в том числе линз, является то, что эта обработка происходит по методу свободного притирания, при реализации которого припуск с заготовки снимается за счет ее проскальзывания относительно инструмента, или наоборот. В рассматриваемом математическом моделировании такое проскальзывание характеризуется скоростью скольжения (или путями трения) обрабатываемой поверхности относительно обрабатывающей. Данная скорость является результирующей сложного движения инструмента относительно заготовки, включающего в себя разные по величине скорости их вращения вокруг собственной оси симметрии и переносного (возвратно-вращательного) движения одной из притирающихся поверхностей. Поэтому задачей математического моделирования обработки по методу свободного притирания является получение аналитического выражения для результирующей линейной скорости скольжения в произвольно выбранной точке на поверхности детали с последующим определением этих скоростей в точках ее диаметрального сечения.

При абразивной обработке выпуклых поверхностей линз по классической технологии заготовку детали закрепляют на шпиндель станка, а инструмент в виде чашки устанавливают на вращающуюся линзу и сообщают ему колебательное движение. Если же необходимо обработать вогнутую поверхность линзы, на шпиндель станка помещают инструмент в виде гриба, по поверхности которого перемещается заготовка. В обоих случаях соединение выходного звена исполнительного механизма станка как с обрабатываемым, так и с наклепным инструментами осуществляется с помощью поводка, шаровой наконечник которого входит в сферическое гнездо хвостовика упомянутых инструментов.

В предлагаемой технологии одновременной двусторонней обработки колебательное движение совершают только обрабатывающие инструменты, причем выпуклый из них соединен с по-

водком жестко и совершает возвратно-вращательное (колебательное) движение вокруг центра обрабатываемой сферической поверхности, а шарнирное соединение последнего с выходным звеном исполнительного механизма технологического оборудования реализуется посредством сопряжения шарового наконечника поводка с сферическим гнездом в выходном звене. При этом во избежание раскрытия стыка (локального нарушение контакта между притирающимися поверхностями инструмента и заготовки) длина поводка должна быть не менее определенного значения, для установления которого обратимся к рис. 1.

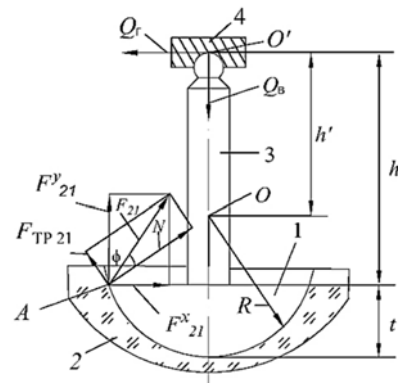


Рисунок 1 – Схема действия сил при обработке вогнутых поверхностей линз малого радиуса кривизны в случае расположения инструмента сверху

На этом рисунке приведена схема действия сил в крайней точке диаметрального сечения инструмента 1, контактирующего с сферической поверхностью радиусом  $R$  линзы 2. Рассматривается момент, когда к поводку 3 приложена сила  $Q_b$ , создающая необходимое давление в зоне контакта притирающихся поверхностей, и сила  $Q_r$ , перемещающая инструмент в данном случае влево. В результате действия этих сил в максимально удаленной от оси симметрии инструмента точке  $A$  контакта инструмента с заготовкой возникают силы реакции  $F_{21}^y = |Q_b|$  и  $F_{21}^x = |Q_r|$ , равнодействующая которых  $F_{21} = \sqrt{(F_{21}^x)^2 + (F_{21}^y)^2}$

может быть разложена на силу трения  $F_{тр21}$  и нормальную силу  $N$ , причем  $N = F_{21} \cdot \cos \varphi$ , где  $\varphi = \arctg f$  – угол трения,  $f$  – коэффициент трения. Наличие силы  $N$  приводит к появлению момента трения  $M_{тр} = fNR$ , который для движения инструмента по обрабатываемой поверхности без раскрытия стыка должен быть меньше



момента движения  $M_{дв} = Q_r \cdot h'$  где  $h'$  – расстояние от центра  $O$  обрабатываемой сферической поверхности детали до точки  $O'$  контакта шарового наконечника поводка 3 с сферическим гнездом в выходном звене исполнительного механизма станка 4. Кроме того, момент движения должен преодолевать также момент от вертикальной силы  $Q_B$   $M_B = Q_B \cdot d / 2$ , где  $d$  – диаметр вогнутой поверхности линзы. Следовательно,  $M_{дв} > M_{тр} + M_B$ , т. е.  $Q_r h' > fNR + 0,5Q_B \cdot d$ .

Отсюда

$$h' = \frac{fNR + 0,5 Q_B d}{Q} \quad (1)$$

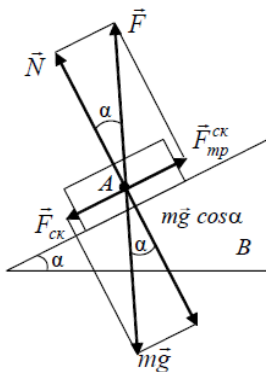


Рисунок 2 – К определению коэффициента трения стекла по металлу по методу «наклонной плоскости»

Коэффициент трения  $f$ , входящий в выражение (1), определяли для случаев шлифования суспензиями микропорошков М40, М28, М10 на чугунных шлифовальниках и полирования суспензией полирита (окись церия) на смоляном и пенополиуретановом полировальниках. При этом использовали метод «наклонной плоскости», согласно которому заготовку из оптического стекла К8 размером 60×10 мм первоначально притирали к инструменту (шлифовальнику или полировальнику) соответствующей абразивной суспензией и, наклоняя инструмент

с заготовкой, определяли угол  $\alpha$  в тот момент, когда заготовка начинала скользить по поверхности инструмента. В этот момент,  $\vec{F}_{тр} = \vec{F}_{ск} = \vec{F}_{тр21}$  где  $\vec{F}_{ск}$  – скатывающая сила.

Согласно рис. 2  $\vec{F}_{ск} = mg \sin \varphi$ ,  $\vec{N} = mg \cos \varphi$ .

Тогда

$$f = \frac{\vec{F}_{тр}}{\vec{N}} = \tan \varphi \quad (2)$$

где  $m$  – масса заготовки.

Расчитанные по формуле (2) значения коэффициента трения  $f$  для вышеотмеченных случаев шлифования и полирования деталей из оптического стекла в условиях свободного притирания приведены в таблице.

Установленные значения коэффициентов трения на границе между стеклом и инструментом с нанесенной на его рабочую поверхность абразивной суспензией позволяют рассчитать длину поводка инструмента, при которой не происходит раскрытие стыка между притирающимися поверхностями и способствует таким образом повышению качества деталей за счет исключения на их исполнительной поверхности локальной погрешности в виде «сорванного края».

Таблица –Значения коэффициента трения

| М4<br>0       | М28            | М10            | Полиро-<br>вальник<br>смоляной | Полиро-<br>вальник<br>пенополи-<br>уретано-<br>вый |
|---------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|
| 0,2 –<br>0,22 | 0,23 –<br>0,25 | 0,27 –<br>0,29 | 0,5 – 0,6                      | 1,1 – 1,2                                          |

### Литература

1. Математическое моделирование рабочей зоны технологического оборудования для двусторонней обработки линз / А.С. Козерук [и др.] // Наука и техника, 2018. – Т. 17, № 3. –С. 204–210.

УДК 628.974

## АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОДИОДНАЯ ПОДСВЕТКА ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Судникевич В.В.<sup>1</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «БелОМО – ЗАО «БЕЛИНТЕГРА», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Светодиодные прожекторы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими источниками света:

1. Отличаются высокой энергетической эффективностью. По сравнению со светильниками на основе ламп накаливания потребление электроэнергии сокращается примерно в 10 раз.

2. Наличие в светодиодах твердотельного источника света и отсутствие хрупких стеклянных

элементов конструкции обеспечивает устойчивость прожекторов к вибрациям и перепаду температур окружающей среды (обычно – 60...+55°С).

3. Отсутствие инерционного источника светового потока (вольфрамовой нити накала или газового наполнителя) и низкие рабочие токи позволяют светодиодным прожекторам выдерживать многократные циклы включения и отключения

электропитания. Ресурс работы составляет порядка 50 000 ч или 6 лет непрерывной работы.

4. Светодиоды имеют минимальное число конструктивных элементов и встроенную систему фокусировки, что обеспечивает им компактные габаритные размеры ( $\varnothing 5 \dots 6$  мм  $\times$  5...10 мм или SMD 0,8...6,0 мм). В прожекторах они легко компонуются в линейные или круговые массивы, а также в сборные независимые модули. Кроме того за счёт малых линейных размеров они легко могут быть встроены в любые архитектурные формы.

5. Светодиоды являются одними из самых безопасных типов осветительных приборов, поскольку не содержат химически ядовитых и опасных веществ, а также хрупких элементов. Они практически не нагреваются и как следствие не становятся причиной возникновения пожара. В их свечении отсутствуют ультрафиолетовая и инфракрасная составляющая.

На сегодняшний день в архитектурной подсветке зданий высокую популярность набирают колорченджеры – прожекторы со встроенной функцией автоматического изменения цвета. Функционально смена цвета осуществляется посредством вращения светофильтров.

Для осуществления подсветки основными критериями выбора колорченджера являются следующие аспекты:

- характеристика встроенного строб-эффекта;
- система и способ фокусировки светового луча;
- ассортимент установленных светофильтров.

Конструктивные модификации колорченджеров определяются компаниями производителями.

Первую группу линейных прожекторов заливающего света составляют изделия компаний: Imlight arch-RGB 36L; SGM IDEA LED BAR 100; Silver Star AM-702; Clay Paqu со встроенными мощными светодиодными блоками Osram Ostar RGBW (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Светодиодный прожектор линейного типа Show-Batten 100

Так, например, цветовая температура в модели Show-Batten 100 линейно корректируется шестьюдесятью макросами в диапазоне от 2500 К до 8000 К, благодаря контролю через выделенный канал СТО. Изменение угла наклона в диапазоне 10..76 градусов осуществляется со скоростью 0,3 с.

Вторую группу составляют блочные архитектурные прожекторы: SGM PALCO 3; SGM

RIBALTA; или серия DELTA 10F (F ZOOM, MEDIUM, SPOT и WIDE) с 10 каналами управления от компании DTS (рисунок 2).

В конструкции предусмотрена установка Rebel LEDs 60 светодиодов мощностью по 3 Вт на один цвет RGBW, обеспечивающих общий световой поток 930; 2100; 5000; 7000; 12900 лк на расстоянии 5 м в пределах 12...25 градусов.



Рисунок 2 – Светодиодный прожектор блочного типа DTS DELTA 10 F RGBW F ZOOM

Третью группу составляют модульные не регулируемые архитектурные прожекторы, например, от компаний: Silver Star YG-LED325XWAT; Imlight arch-RGB 36 с пятью каналами управления и встроенным программным обеспечением (рисунок 3).



Рисунок 3 – Светодиодный прожектор модульного типа Imlight arch-RGB 36-15

36 светодиодов мощностью 1 Вт обеспечивают угол рассеивания луча в пределах 15 градусов.

Последнюю четвертую группу составляют точечные Tri-color LED архитектурные прожекторы направленного действия, например Silver Star AD 925E DOJO 3/1 или AD926E DOJO 6/2 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Светодиодный прожектор точечного типа AD926E DOJO 6/2

Управление изменением цвета во всех рассмотренных выше прожекторах осуществляется по протоколу DMX-512. Протокол поддерживает 512 адресов/каналов и позволяет присоединять к одному контроллеру DMX до 170 источников RGB-освещения (RGB-прожекторы, модули, светодиодные ленты и линейки).

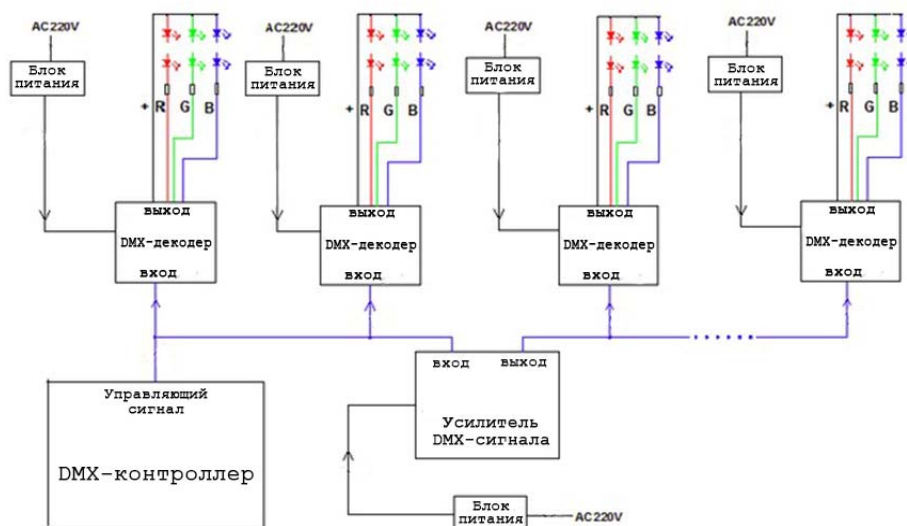


Рисунок 5 – Схема подключения прожекторов по протоколу DMX-512

Протокол разработан комитетом USITT, как средство управления диммерами с различных консолей через стандартный интерфейс. Система связи между устройствами строится на высококачественных кабелях (типа 24 AWG (7/0.2) или выше) и разъемах (XLR), которые должны соответствовать стандарту EIA485 (RS485) и определяются длиной линии.

Корректная работа сети DMX512 (особенно при использовании длинных кабелей) возможна только в том случае, когда от передающего устройства к принимающему идет одна единственная линия [2].

На практике рекомендуется использовать линии длиной не более 500 м. В противном случае надо предусмотреть возможность использования усилителей сигнала (репитеров).

Для работы конечного светового устройства нужен DMX-декодер (рисунок 5).

Существенным ограничением протокола DMX-512 является невозможность использования

У-кабелей, особенно на большом удалении от передающего устройства, что приводит к возникновению сложного набора отраженных сигналов, а также вызывает серьезные искажения исходных сигналов и способствует увеличению числа сбоев всей системы. Единственным надежным методом разделения линии DMX512 на две или несколько ветвей является использование усилителей-разветвителей [3].

#### Литература

1. Красный сектор. Главная/Каталог/Световое оборудование/ Архитектурные светильники и светодиодные приборы. 2014. <http://redsector.ru/>.
2. Adam Bennette. Руководство по применению DMX512. Copyright © PLASA 1994. – Перевод на русский язык и оформление "ДСЛ" 1995-2012. <http://dsl.msk.ru/rus/around/dmx512/dmx512.htm#p2>
3. Управление RGB прожекторами. 2013-2017. <http://светомастер.рф/>.

УДК 535.37

#### СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЫХ НЕОДИМОВЫХ ФТОРИДНЫХ СТЕКОЛ С НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ ФОСФАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Демеш М.П.<sup>1</sup>, Гусакова Н.В.<sup>1</sup>, Дернович О.П.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Колобкова Е.В.<sup>2</sup>, Никоноров Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Фторфосфатные стекла, как лазерные материалы, отличаются низкой энергией фононов, сохраняют высокое оптическое качество при больших концентрациях РЗИ и имеют широкие спектральные линии, что представляет интерес для получения или усиления коротких световых импульсов.

В данной работе изучались фторфосфатные стекла состава  $5\text{Ba}(\text{PO}_3)_2\text{-AlF}_3\text{-CaF}_2\text{-MgF}_2\text{-BaF}_2\text{-SrF}_2\text{-xNdF}_3$  где  $x = 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 5$  мол. %. Исходные материалы нагревались в углеродном тигле в аргоновой атмосфере при температуре 1000–1050°C. Затем охлажденные образцы отжигались при 450° С близкой температуре стекло-

вания для устранения внутренних напряжений в стекле.

Спектры поглощения регистрировались на спектрофотометре Cary 5000. Спектры люминесценции записывались на экспериментальной установке, состоящей из монохроматора МДР 23, синхронного усилителя SR830 и фотоприемного устройства, связанного с компьютером. Источником возбуждения люминесценции являлся лазерный диод (ЛД), работающий на длине волны  $\approx 808$  нм. Кинетики затухания люминесценции регистрировались цифровым запоминающим осциллографом, сопряженным с фотоприемником и монохроматором МДР 12. Люминесценция возбуждалась световым импульсом параметрического генератора длительностью  $\approx 20$  нс на длине волны  $\approx 808$  нм.

На рис. 1 показаны спектры сечений поглощения образцов фторфосфатных стекол с  $\text{Nd}^{3+}$ . По спектрам сечений (см. рис. 1) был проведен расчет интенсивностей линий в спектре поглощения по методу Джадда-Офельта (Д-О).

Значения матричных элементов приведенного тензора  $U$  были взяты из работы [1]. Экспериментальные и расчетные значения сил осцилляторов представлены в таблице 1.

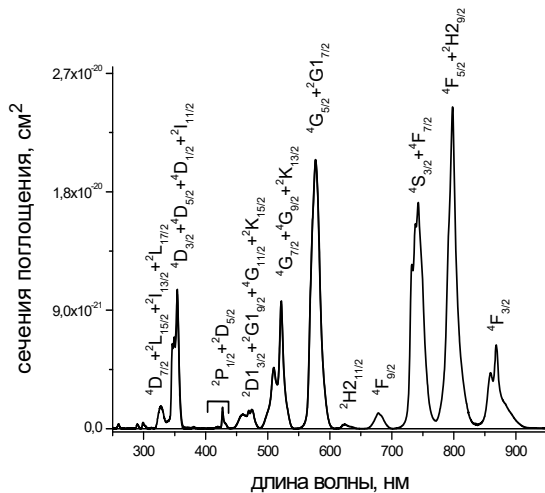


Рисунок 1 – Спектры сечений поглощения ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в образцах фторфосфатных стекол

Таблица 1 – Экспериментальные  $f_{\text{exp}}^{\text{ed}}$  и расчетные  $f_{\text{calc}}^{\text{ed}}$  электродипольные силы осцилляторов

| Возбужденные состояния                       | $f_{\text{exp}}^{\text{ed}} \cdot 10^6$ | $f_{\text{calc}}^{\text{ed}} \cdot 10^6$ |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| $4F_{3/2}$                                   | 1.78                                    | 1.95                                     |
| $4F_{5/2}, 2H_{29/2}$                        | 6.84                                    | 6.74                                     |
| $4S_{3/2}, 4F_{7/2}$                         | 7.11                                    | 7.31                                     |
| $4F_{9/2}$                                   | 0.48                                    | 0.56                                     |
| $4G_{5/2}, 2G_{17/2}$                        | 11.22                                   | 11.28                                    |
| $2K_{13/2}, 4G_{9/2}, 4G_{7/2}$              | 5.69                                    | 4.59                                     |
| $2K_{15/2}, 4G_{11/2}, 2G_{19/2}, 2D_{13/2}$ | 1.56                                    | 1.13                                     |
| $2P_{1/2}+2D_{15/2}$                         | 0.39                                    | 0.52                                     |
| $4D_{3/2}, 4D_{5/2}, 4D_{1/2}, 2I_{11/2}$    | 8.97                                    | 9.43                                     |
| rms. dev. $10^6$                             | 0.53                                    |                                          |

В таблице 2 приведены значения омега параметров, которые получаются при подгонке расчетных электродипольных сил осцилляторов к экспериментальным.

Таблица 2 – Омега параметры

| $\Omega_2 \cdot 10^{20}, \text{cm}^2$ | $\Omega_4 \cdot 10^{20}, \text{cm}^2$ | $\Omega_6 \cdot 10^{20}, \text{cm}^2$ |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 2.005                                 | 4.025                                 | 5.674                                 |

На рис. 2 представлен спектр люминесценции ионов  $\text{Nd}^{3+}$  с уровня  $4F_{3/2}$ .

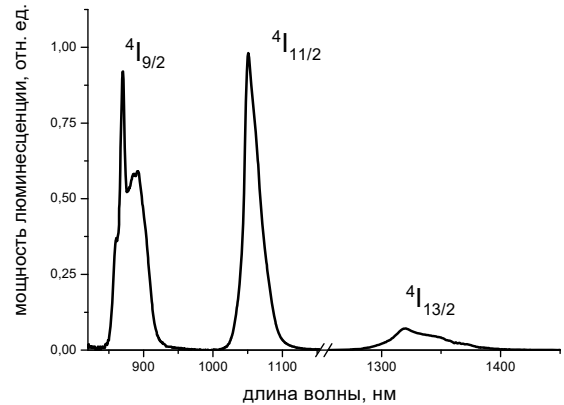


Рисунок 2 – Спектр люминесценции ионов  $\text{Nd}^{3+}$  с уровня  $4F_{3/2}$  для образца стекла с содержанием  $\text{NdF}_3$  0.1 мол. %.

Коэффициенты ветвления люминесценции с уровня  $4F_{3/2}$ , рассчитанные по Д-О весьма близки к экспериментально полученным значениям, см. таблицу 3.

Таблица 3 – Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов ветвления люминесценции с уровня  $4F_{3/2}$

|                                  | $\lambda, \text{nm}$ | $\beta_{\text{exp}}, \%$ | $\beta_{\text{calc}}, \%$ |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ | 1860                 | 0                        | 0.5                       |
| $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ | 1325                 | 7                        | 11                        |
| $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ | 1056                 | 50                       | 50                        |
| $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$  | 880                  | 43                       | 38                        |

Также из расчетов по Д-О были определено радиационное время жизни уровня  $4F_{3/2}$ , которое составило 452 мкс.

Существенно важными характеристиками неодим содержащих сред как лазерных материалов являются сечения стимулированного испускания на переходах  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ ,  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$  и  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ . Для двух первых переходов сечения были определены по формуле Фюхтбауэра-Ладенбурга (ФЛ) [2] и представлены на рис. 3.

Переход  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$  является квази трехуровневым, что приводит в общем случае к переполнению люминесценции и, следовательно, к искажению спектра сечения стимулированного испускания рассчитанному по ФЛ.

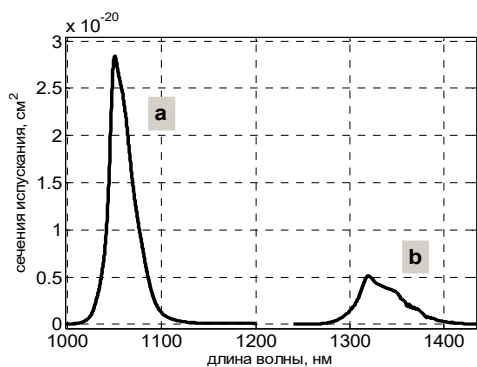


Рисунок 3 – Спектры сечений стимулированного испускания на переходах  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  (a) и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  (b)

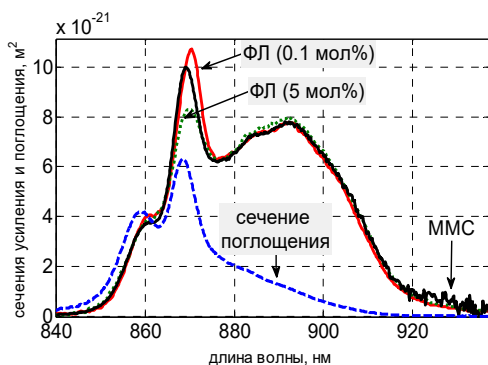


Рисунок 4 – Спектры сечения стимулированного испускания на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  рассчитанные по ФЛ и ММС

В этом случае можно воспользоваться модифицированным методом соответствия (ММС) [2], который свободен от влияния перепоглощения. На рис. 4 представлены спектры сечений стимулированного испускания рассчитанные по ФЛ и ММС. Видно, что для образцов с малым

содержанием  $NdF_3$  оба метода приводят к практически одинаковому результату.

При исследовании кинетик затухания люминесценции с уровня  ${}^4F_{3/2}$  был установлен неэкспоненциальный характер затухания люминесценции. Была исследована концентрационная зависимость эффективного времени жизни уровня  ${}^4F_{3/2}$  и было показано, что основным механизмом концентрационного тушения люминесценции является диполь-дипольное взаимодействие.

Таким образом, в данной работе были исследованы спектроскопические характеристики фторфосфатных стекол с различным содержанием  $NdF_3$  группы. На основе спектров сечений поглощения был проведен расчет по Д-О и определены коэффициенты ветвления люминесценции с уровня  ${}^4F_{3/2}$  и его радиационное время жизни. Это позволило рассчитать спектры сечений стимулированного испускания на переходах  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ . Также было показано, что основным механизмом концентрационного тушения люминесценции с уровня  ${}^4F_{3/2}$  является диполь-дипольное взаимодействие.

#### Литература

1. А.А. Kaminskii, G. Boulon, M. Buoncrisiani et al, Spectroscopy of a new laser garnet  $Lu_3Sc_2Ga_3O_{12}:Nd^{3+}$ , Phys. Stat. Sol. (a), V.141, pp. 471–494, (1994)
2. А.С. Ясюкевич, В.Г. Щербицкий, В.Э. Кисель и др. Интегральный метод соответствия в спектроскопии лазерных кристаллов с примесными центрами, Журнал прикладной спектроскопии, Т. 71, № 2. – С. 187–192, (2004).

УДК 535.37

### СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКОМАТЕРИАЛОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТУЛЛИЯ

Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Демеш М.П.<sup>1</sup>, Гусакова Н.В.<sup>1</sup>, Дернович О.П.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Рачковская Г.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический институт, Минск, Республика Беларусь

Стекла и кристаллы активированные ионами туллия, представляют интерес для создания на их основе лазерных источников излучающих в области спектра 2 мкм. Они находят применения в системах дистанционного зондирования атмосферы, оптической связи, экологического мониторинга окружающей среды. [1].

В данной работе изучены спектроскопические характеристики легкоплавких оксифторидных стекол, синтезированных на основе системы  $SiO_2-GeO_2-PbO-PbF_2-CdF_2$  и активированных ионами туллия  $Tm^{3+}$ . Исследуемые оксифторидные стекла отличаются низкой температурой

синтеза ( $950 \pm 50$  °С), что выгодно отличает их от оксидных силикатных и боросиликатных стекол, для получения которых требуются более высокие температуры ( $1300-1500$ °С). Кроме того, преимуществом этих стекол является то, что они сочетают в себе хорошие спектроскопические, структурные и тепловые характеристики, а также химическую устойчивость, присущие фторидным и оксидным матрицам. Ионы туллия вводились в состав стекла оксидом  $Tm_2O_3$ , содержание которого составляло: 0.01, 0.1, 0.5, 1,0 и 2,0 мол. %.

Спектры поглощения записывались на спектрофотометре Cary 5000, регистрация спектров

люминесценции осуществлялась по методу синхронного детектирования на экспериментальной установке, состоящей из монохроматора МДР 23, синхронного усилителя SR830 и набора фотоприемников на ближнюю инфракрасную и видимую области спектра. В качестве источника возбуждения люминесценции использовался лазерный диод (ЛД), работающий на длине волны 800 нм. Кинетики затухания люминесценции регистрировались на установке, где люминесценция с уровня  $^3\text{H}_4$  возбуждалась коротким импульсом (длительность  $\approx 20$  нс, длина волны возбуждающего импульса  $\approx 760$  нм), выделялась монохроматором МДР 12 и регистрировалась фотоприемником, сопряженным с цифровым запоминающим осциллографом.

На рис. 1 представлены спектры сечений поглощения исследуемых оксифторидных стекол с ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . Полученные спектры сечений позволили провести расчет интенсивностей линий в спектре поглощения по методу Джадда-Офельта (Д-О).

Значения матричных элементов приведенного тензора  $U$  были взяты из работы [2]. Экспериментальные и расчетные значения сил осцилляторов представлены в таблице 1.

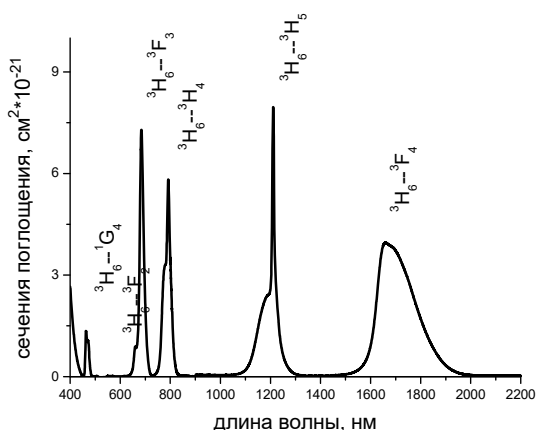


Рисунок 1 – Спектры сечений поглощения ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в образцах оксифторидных стекол

В таблице 2 приведены значения омега параметров, которые получены при подгонке расчетных электродипольных сил осцилляторов к экспериментальным.

Таблица 1 – Экспериментальные  $f_{\text{exp}}^{\text{ed}}$  и расчетные  $f_{\text{calc}}^{\text{ed}}$  электродипольные силы осцилляторов

| Возбужденные состояния       | $f_{\text{exp}}^{\text{ed}} 10^6$ | $f_{\text{calc}}^{\text{ed}} 10^6$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| $^3\text{F}_4$               | 3.11                              | 3.12                               |
| $^3\text{H}_5$               | 2.05                              | 1.92                               |
| $^3\text{H}_4$               | 3.02                              | 3.07                               |
| $^3\text{F}_3, ^3\text{F}_2$ | 4.17                              | 4.27                               |
| $^1\text{G}_4$               | 1.07                              | 1.01                               |
| rms. dev. $10^6$             | 0.12                              |                                    |

Таблица 2 – Омега параметры

| $\Omega_2 10^{20}$ , $\text{cm}^2$ | $\Omega_4 10^{20}$ , $\text{cm}^2$ | $\Omega_6 10^{20}$ , $\text{cm}^2$ |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 4.04                               | 2.95                               | 1.51                               |

Из расчетов по Д-О были получены радиационные времена жизни важных с практической точки зрения уровней энергии  $^3\text{F}_4$  и  $^3\text{H}_4$ , 4.2 мс и 840 мкс, соответственно.

Для получения генерации в области  $\approx 1.7 - \approx 2$  мкм используется переход  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  (рис. 2).

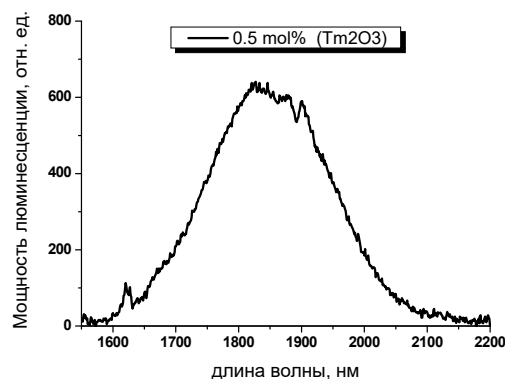


Рисунок 2 – Спектр люминесценции иона  $\text{Tm}^{3+}$  в оксифторидном стекле на переходе  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$

Весьма эффективным способом заселения верхнего лазерного уровня  $^3\text{F}_4$  концентрированных тулиевых сред является накачка в области 800 нм (переход  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ ) с последующей передачей энергии возбуждения на уровень  $^3\text{F}_4$  по кросс-релаксационной схеме  $^3\text{H}_6 + ^3\text{H}_4 \rightarrow 2 ^3\text{F}_4$ . Квантовая эффективность такой схемы накачки  $\approx 2$ . В этой связи представляет интерес изучение процесса донор-акцепторной (Д-А) передачи энергии от возбужденных ионов тулия (доноров) к невозбужденным ионам (акцепторам). Это удобно делать, используя кинетики затухания люминесценции на переходе  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ , которые представлены на рис. 3.

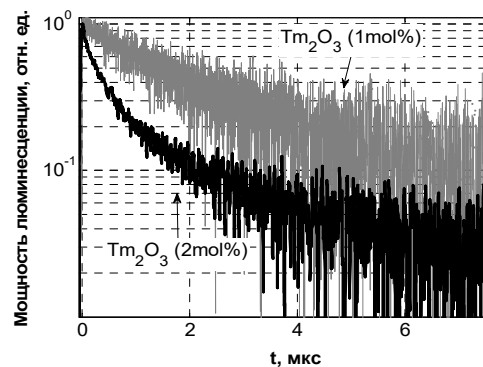


Рисунок 3 – Кинетики затухания люминесценции  $\text{Tm}^{3+}$  в оксифторидном стекле на переходе  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$

Как видно из рис. 3 затухание носит неэкспоненциальный характер. Для определения доминирующего механизма передачи энергии использован подход, предложенный в [3], в котором

исследуется концентрационная зависимость эффективного времени затухания люминесценции  $\tau_{1/e}(N_{Tm})$ , определенной по уровню  $1/e$  от мощности люминесценции в начальный момент времени. Такая зависимость для наших материалов представлена на рис.4, там же дана аппроксимационная зависимость

$$\tau_{1/e}(N_{Tm}) = \frac{\tau_0}{1 + (N_{Tm}/N_0)^{S/3}}$$

Здесь  $\tau_0$  – внутрицентровое время затухания (при  $N_{Tm} \rightarrow 0$ ),  $N_{Tm}$  – концентрация ионов  $Tm^{3+}$ ,  $N_0$  – характерная концентрация ионов (при  $N_{Tm} = N_0$  вероятность опустошения уровня  ${}^3H_4$  в результате Д-А взаимодействия равна  $1/\tau_0$ ),  $S$  – величина, определяющая мультипольность Д-А взаимодействия ( $S=6$  – диполь-дипольное,  $S=8$  – диполь-квадрупольное и  $S=10$  – квадруполь-квадрупольное взаимодействие).

Для исследуемых оксифторидных стекол были получены следующие величины:  $N_0 = 1.65 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_0 = 300$  мкс,  $S = 10.5$ . Это указывает на то, что квадруполь-квадрупольное взаимодействие является определяющим при передаче энергии с возбужденного уровня  ${}^3H_4$  на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$ .

Таким образом, для оксифторидных стекол, активированных ионами туллия определены па-

раметры Д-О и установлен механизм кросс-релаксационного заселения верхнего лазерного уровня  ${}^3F_4$ .

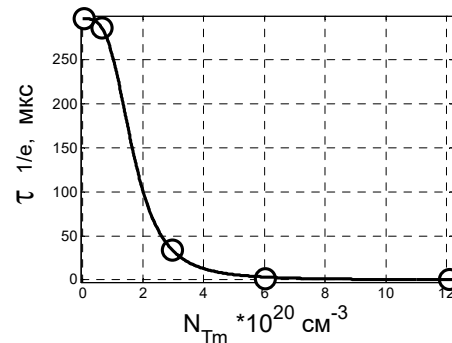


Рисунок 4 – Зависимость  $\tau_{1/e}(N_{Tm})$  от концентрации ионов  $Tm^{3+}$

### Литература

1. K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann, P. Fuhrberg, 2  $\mu\text{m}$  laser sources and their possible applications, *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, B. Pal, ed., Intech, 2010, pp. 471–500.
2. B. Walsh et al «Branching ratios cross sections, and radiative lifetimes of rare earth ions in solids: applications to  $Tm^{3+}$  and  $Ho^{3+}$  ions in  $LiF_4$ », *J. Appl. Phys.*, V 83, pp. 2772–2787, (1998)
3. G. Armagan, A.M. Buoncristiani «Excited state dynamics of thulium ions in Yttrium Garnets», *Optical Material V. 1*, pp. 11–20, 1992.

УДК 621.373.826

## СИСТЕМА ЮСТИРОВКИ И ВАРИАНТ КОНСТРУКЦИИ РЕЗОНАТОРА МИНИАТЮРНОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ Кузьмин В.И.<sup>1,3</sup>, Кисель В.Э.<sup>1,2</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1,3</sup>, Власенко Е.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Частное предприятие «Ватман-Про», Минск, Республика Беларусь

Лазеры на эрбиевом стекле находят широкое применение в радарных системах и дальномерах, работающих в импульсном режиме с высокой частотой следования импульсов. Кроме того, рабочая область спектра для данных лазеров является безопасной для зрения человека. Диодная накачка позволяет в лазерах на эрбиевом стекле увеличить частоту следования импульсов (с энергией в одиночном импульсе 1 мДж и выше) до 50 Гц [1].

Резонатор лазера состоит из лазерного диода 1, фокусирующей системы 2, входного плоского зеркала 3 и плоского выходного зеркала 5 (рисунок 1).

Источником накачки служит полупроводниковый диод с максимальной мощностью 25 Вт на длине волны 976 нм. В качестве активного

элемента используется кристалл  $Er(1,5 \text{ ат.}\%), Yb(12 \text{ ат.}\%)$ : YAB толщиной 2 мм, вырезанный перпендикулярно оси «с». В качестве пассивного затвора используется кристалл  $Co:MALO$ .

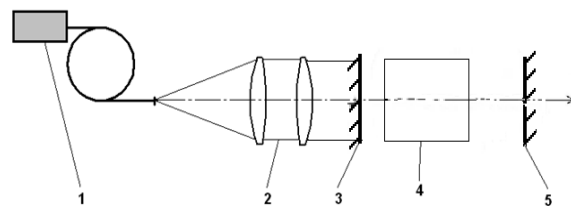


Рисунок 1 – Оптическая схема миниатюрного лазера на эрбиевом стекле

Режим пассивной модуляции добротности был получен на длине волны 1522 нм. Порог генерации по поглощенной мощности накачки составил 1,96 Вт. Максимальная энергия импульсов лазерной генерации составила 5 мкДж, длительность импульсов модуляции добротности составила 6,1 нс, частота повторения – 60 кГц, средняя выходная мощность лазера при поглощенной мощности накачки 5,63 Вт составила 300 мВт. Дифференциальная эффективность генерации равна 9,6%. При дальнейшем увеличении мощности накачки не происходило существенного увеличения средней выходной мощности генерируемого излучения, что связано с нагревом активной среды при больших мощностях накачки из-за пассивного охлаждения. Поэтому выходную мощность 300 мВт можно считать максимальной выходной мощностью лазера на длине волны 1522 нм, только для данного резонатора.

Выходные характеристики Er,Yb:YAB лазера в режиме пассивной модуляции добротности представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Выходные характеристики Er,Yb:YAB лазера в режиме пассивной модуляции добротности

| Ток накачки, А | Поглощенная мощность накачки, Вт ±3% | Средняя выходная мощность, мВт ±3% | Частота следования импульсов, кГц ±1% | Длительность импульса, нс ±1 нс | Энергия в импульсе, мкДж ±2% |
|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 11             | 3,28                                 | 124                                | 30,9                                  | 7,1                             | 4,0                          |
| 12             | 3,86                                 | 184                                | 41,5                                  | 6,6                             | 4,4                          |
| 13             | 4,45                                 | 236                                | 50,1                                  | 6,3                             | 4,7                          |
| 14             | 5,03                                 | 272                                | 56,9                                  | 6,2                             | 4,9                          |
| 15             | 5,63                                 | 300                                | 59,6                                  | 6,1                             | 5,0                          |

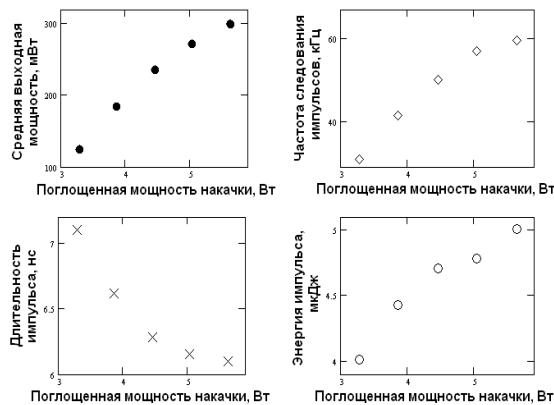


Рисунок 2 – Выходные характеристики лазера на основе кристалла Er,Yb:YAB в режиме пассивной модуляции добротности

Работа лазера в режиме пассивной модуляции добротности также была промоделирована в рамках системы балансных уравнений. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования для поглощенной мощности накачки 5,63 Вт представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования для поглощенной мощности накачки 5,63 Вт

| Стадия                         | Средняя выходная мощность, мВт | Частота следования импульсов, кГц | Длительность импульса, нс | Энергия в импульсе, мкДж |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Математическое моделирование   | 305,5                          | 65,4                              | 9                         | 4,7                      |
| Экспериментальные исследования | 300                            | 59,6                              | 6,1                       | 5,0                      |

Эффективность модуляции добротности, определяемая как отношение средней мощности генерации в режиме модуляции добротности к средней мощности генерации в непрерывном режиме составила 52%.

Во всем используемом диапазоне мощности накачки был получен стабильный режим модуляции добротности. Осциллограммы одиночного импульса и цуга импульсов для средней выходной мощности излучения 300 мВт приведены на рисунках 3 и 4.

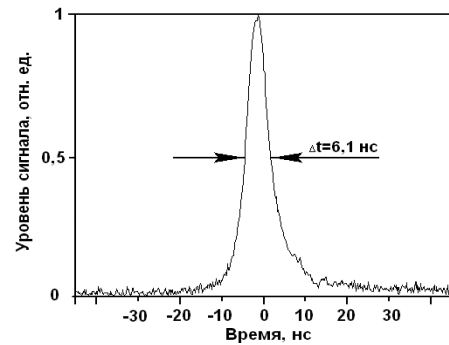


Рисунок 3 – Осциллограмма одиночного импульса Er,Yb:YAB лазера в режиме пассивной модуляции добротности

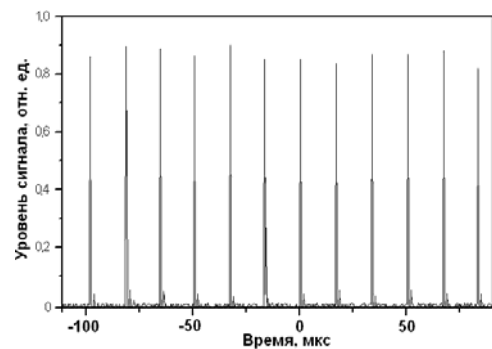


Рисунок 4 – Осциллограмма цуга импульсов Er,Yb:YAB лазера в режиме пассивной модуляции добротности

Вариант конструкции миниатюрного эрбиевого лазера представлен на рисунке 5. Основными элементами являются: корпус резонатора 1, оправа входного зеркала 2, оправа выходного



зеркала 3. Оправы зеркал входят в прямоугольные пазы корпуса 1 и фиксируются штифтами, обеспечивая возможность юстировки только в одном направлении.

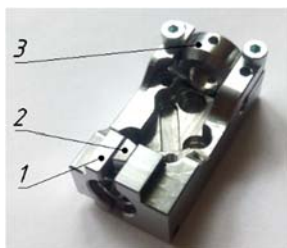


Рисунок 5 – Внешний вид корпуса резонатора эрбиевого лазера

Процесс юстировки резонатора заключается в выдерживании требуемого допуска параллельности (1 мкм) между зеркалами. Оправа с зеркалом поз. 2 (рисунок 5) посредством юстировочных винтов может отклоняться от гори-

зонтальной оси на угол  $\varphi = 1^\circ$  в обе стороны. Юстировочные винты перемещаются по грани трапеции, заклоняя таким образом зеркало в оправе. Оправа 3 с выходным зеркалом (рисунок 5) юстируется относительно входного зеркала путем заклонения на такой же угол ( $\varphi = 1^\circ$ ). Такое техническое решение позволяет получить одновременно приемлимую чувствительность (30"/1 оборот юстировочного винта) и высокую жесткость при малых габаритах резонатора (Д×Ш×В 300×15,3×12 мм). После выставления параллельности зеркал, установочные винты фиксируются лаком, что предохраняет их от самоотвинчивания при сильных вибрациях.

#### Литература

Wu R., Myers J., Myers M., Wisnewski T. Proc. OSA Adv. Sol. State Laser (ASSL). Boston, USA. 1999. – P. 236.

УДК 620.1.05

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКА АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛА

Звонкович А.В., Фёдорцев Р.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В свое время астрономы всего мира столкнулись с такой проблемой, как искажение изображения телескопической системы, вследствие непостоянства характеристик состояния атмосферы. Одним из существенных факторов, влияющих на качество наблюдения источника излучения с поверхности Земли, является неравномерность нагревания атмосферы. При прохождении излучения сквозь атмосферу, происходит ослабление энергии излучения, а так же привносится собственное излучение атмосферы. Степень искажения исходного сигнала зависит от ряда факторов атмосферного воздействия. К ним относятся турбулентность, поглощение газами, рассеяние на частицах и др. Наиболее существенное влияние оказывает атмосферная турбулентность – конвекционное движение газа, вызванное флуктуациями плотности воздуха, вследствие неравномерного поглощения солнечного излучения, вносящего вклад в нагрев, в нижних слоях атмосферы. Его влияние оказывается наиболее существенным, поскольку данный фактор оказывает воздействие на постоянство показателя преломления среды, неравномерность которого вызывает изменение формы волнового фронта. В результате изображение наблюдаемого объекта имеет вид дрожащего смазанного пятна [1].

Решением данной проблемы занимается адаптивная оптика – раздел физической оптики, изучающий методы устранения нерегулярных

искажений, возникающих при распространении света в неоднородной среде, с помощью управляемых оптических элементов. Принципы адаптивной оптики применяются при конструировании наземных астрономических телескопов, в системах оптической коммуникации, в промышленной лазерной технике, в офтальмологии и других областях, где требуется компенсировать атмосферные искажения или аберрации оптических систем.

Управляемым оптическим элементом, как правило, является деформируемое зеркало, которое выполняется в виде сегментированных зеркал либо в виде зеркала со сплошной поверхностью. Выбор той или иной конструкции определяется спецификой системы, в которой она будет использоваться.

Сегментированные зеркала состоят из отдельных независимых плоских элементов, которые в процессе юстировки наклоняют или смещают в линейном направлении. Основным преимуществом сплошных зеркал перед сегментированными является возможность реализации гораздо более сложной формы поверхности при меньших габаритах системы. Так же между соседними сегментированными зеркалами имеются воздушные промежутки, необходимые для проведения из взаимной юстировки посредством небольших наклонов относительно вертикальной оси. Однако добиться идеального совмещенного изображения в одном контуре практически не-

возможно, поскольку имеет место скорее некоторая общая зона перекрытия изображений от каждого отдельного элемента.

Рассмотрим возможные конструктивные варианты их реализации. Получение поверхности более сложной формы возможно в случае применения мембранных зеркал, реализуемых на основе широкого спектра различных физических эффектов. Наиболее часто встречаются мембранные зеркала на основе диэлектриков с особыми свойствами – пьезоэлектриков, сегнетоэлектриков [2]. В основе пьезоэффекта лежит явление деформации материала под воздействием электрического поля, позволяющее производить изменение кривизны мембраны. Приводам на основе биморфных пьезоэлементов (рис. 1) присуще явление гистерезиса, из-за которого происходит «запаздывание» деформаций отражающей поверхности, однако существуют методы компенсации данного явления.

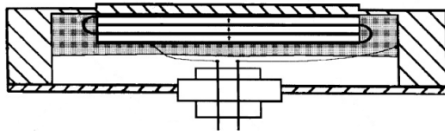


Рисунок 1 – Мембранное зеркало на основе биморфных пьезоэлементов

Мембранное зеркало на основе сегнетоэлектриков обладает высокой чувствительностью при малых значениях напряженности управляющего сигнала. Однако устройство не позволяет получить значительные перемещения поверхности зеркала. Так же для приводов мембранных зеркал используются электромагнитные явления. Находят применение конструкции с магнито-стрикционными материалами способными изменять размеры, при изменении состояния намагниченности тела. Возможно использование привода на основе магнитной жидкости (рис. 2), при воздействии на которую электромагнитом, наблюдается её деформация, позволяющая выравнивать волновой фронт.

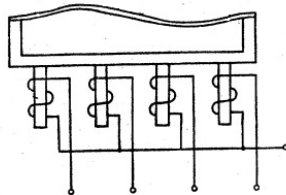


Рисунок 2 – Мембранное зеркало на основе магнитной жидкости

Преимуществом является тот факт, что мембрана искривляется посредством жидкости, а, следовательно, происходит плавное изменение поверхности зеркала.

Простейший вариант использования магнитных полей – это постоянные магниты, находящиеся под воздействием электромагнитов, взаимодействие которых так же позволяет получать

перемещения, применимые в мембранных зеркалах. Существует способ управления кривизной адаптивного зеркала, заключающийся в герметичном закреплении пленки по краю основания с корректирующими устройствами посредством оправы, формовании из пленки отражающей поверхности заданной кривизны путем создания перепада давления на поверхности пленки (рис. 3).

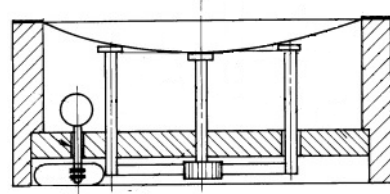


Рисунок 3 – Мембранное зеркало на основе перепада давления

Однако такое адаптивное зеркало не обеспечивает высокоточную регулировку изменения перепада давления (мм рт. ст.) с одновременным контролем заданной формы поверхности пленки при воздействии таких климатических факторов, как порывы ветра, перепады температуры и т. п. в процессе работы зеркала.

В конструкциях мембранных зеркал возможно использование различных термических эффектов (рис. 4), как, например, взаимодействие термочувствительных сплавов с памятью формы с нагревателями.

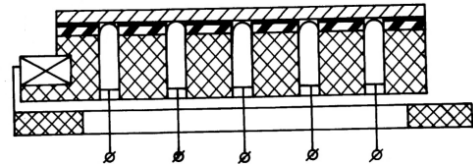


Рисунок 4 – Мембранное зеркало на основе термочувствительных сплавов

К минусам данного способа можно отнести нагрев зеркала и инерционность изменения температуры материала.

Как упоминалось ранее, мембранные зеркала могут искривляться посредством магнитных силовых полей, однако проведенный патентный поиск не показал наличия существующих вариантов конструкций.

В данной работе предложена схема выравнивания волнового фронта на основе взаимодействия постоянных переменных магнитных полей.

На схеме (рис. 5) показана мембрана, обладающая определенной упругостью, в качестве материала мембраны может выступать тонкий лист металла, однако возможно использование и комбинированных упругих материалов, армированных металлической сеткой. С наружной стороны наносится зеркальное покрытие, а с обратной стороны крепятся постоянные магниты не больших размеров с помощью конструкционного клея. Соосно с центром каждого из магни-

тов устанавливаются соленоиды, при подаче напряжения на которые, возникает магнитное поле, действующее на магнитное поле постоянных магнитов. Таким образом, меняя полярность напряжения подаваемого на соленоид, учитывая массу магнита, упругость мембраны и прочие факторы, можно добиться перемещений мембраны.

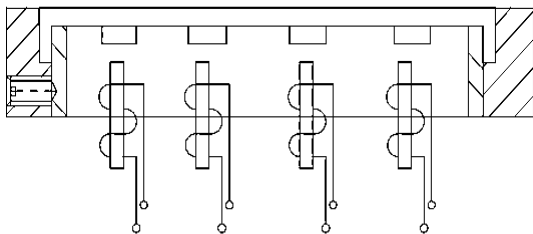


Рисунок 5 – Мембранное зеркало на основе магнитных полей

Выбор параметров соленоидов или других параметров осуществляют на основе формул, полученных из второго закона Ньютона и математического выражения силы Ампера.

$$F_A = (m_1 + m_2) \cdot \frac{2x}{t^2} + F_1 + F_2 + F_{\text{упр}};$$

где  $m_1$  – масса участка деформируемой мембраны;  $m_2$  – масса постоянного магнита,  $x$  – минимальное смещение центра толщины мембраны,  $t$  – время смещения центра толщины мембраны,  $F_1$  – сила тяжести участка мембраны,  $F_2$  – сила тяжести постоянного магнита,  $F_{\text{упр}}$  –

сила упругости, с которой материал сопротивляется смещению.

$$F_A = \frac{I_c^2 \cdot w \cdot l_{\text{пр}}}{l_c} = B \cdot I_c \cdot l_{\text{пр}}$$

$F_A$  – сила Ампера, с которой соленоид действует на проводник, помещенный в магнитное поле,  $I_c$  – сила тока в соленоиде,  $l_{\text{пр}}$  – длина проводника,  $w$  – количество витков соленоида,  $l_c$  – длина соленоида,  $B$  – магнитная индукция.

В данном случае, магнитному полю постоянного магнита соответствует эквивалентное магнитное поле проводника с током, и соответствующая длина проводника.

На основании приведенных выражений можно рассчитать требуемые конструктивные параметры соленоида и уровень управляющего напряжения.

Большой выбор используемых явлений дает возможность выбора определенного метода искривления поверхности мембранного зеркала, в зависимости от требуемых характеристик и условий функционирования зеркала.

#### Литература

1. Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов. Адаптивная оптика / Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО. – 2012. – 297 с.
2. Патент РФ №2186412. Адаптивное зеркало. Панич А.Е., Житомирский Г.А. Заявл. 13.06.2001. Оpubл. 27.07.2002.

УДК 535.015, 535.422

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕЛЕСКОПА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Направление основано на так называемом апертурном синтезе, при котором несколько телескопов меньшего размера, в дальнейшем именуемых модулями, формируют общее изображение. По качеству оно эквивалентно изображению, полученному обычным телескопом со «сплошной» оптикой поверхностью, апертура которого соответствует суммарной, синтезированной из апертур отдельных зеркальных модулей при условии согласованной фазы излучения и геометрического совмещения изображений, формируемых каждым модулем. Телескопы с Синтезированной Апертурой (ТСА) обладают многими преимуществами перед квазисплошными, что делает направление исследований перспективным для построения больших телескопов. Потребность телескопов больших апертур порядка 30–40 м особенно актуальна для приборов космического базирования, расположенных на геостационарной орбите (ГСО) высотой более

35 000 км и обеспечивающих разрешение на местности на уровне 10–30 см.

Однако вывод на орбиту таких систем представляется собой достаточно трудную задачу, что и обуславливает перспективность исследования систем с апертурным синтезом. Обозначим главные достоинства таких систем:

1. ТСА представляет собой компактную конструкцию, габаритные размеры которой определяются длиной модуля и относительным отверстием главного зеркала. Таким образом, при равных условиях, длина модуля, может быть во столько раз меньше длины сплошного телескопа, во сколько раз диаметр модуля меньше диаметра синтезированной апертуры. Кроме того, известно, что масса, как и стоимость изготовления оптических компонентов при одинаковой конструкции и требованиях к точности, пропорциональна кубическому диаметру, что также обуславливает хорошие экономические показатели ТСА.

2. К оптическим компонентам модулей предъявляются менее жёсткие требования по сравнению с аналогичными сегментами квазисплошных зеркал. В частности отпадает необходимость в применении внеосевых асферических компонентов, которые как правило являются обязательными для сегментов главного зеркала. Не требуется с большой степенью точности выдерживать равенство радиусов кривизны зеркал модулей в процессе изготовления, поскольку необходимую подгонку фокусных расстояний модулей можно легко осуществить в процессе их юстировки.

3. Конструкция ТСА позволяет изготавливать и юстировать отдельные модули независимо друг от друга и даже использовать их как самостоятельные телескопы, затем собирать ТСА из готовых модулей, постепенно наращивая их количество, что особенно важно для космических телескопов.

4. Подвижные элементы, осуществляющие совмещение и фазирование изображений в процессе работы, имеют значительно меньшие габариты, массу и момент инерции, чем элементы сегментированного главного зеркала.

Выбор количества модулей производится в соответствии с несколькими критериями:

- оптимальный коэффициент заполнения апертуры отдельными элементами (увеличение количества модулей ведет к уменьшению апертуры каждого из них);
- обеспечение технологичности производства, сборки и юстировки;
- обеспечение надежности работы;
- наилучшие экономические показатели.

Выбор конечного решения всегда является компромиссным, так как влияние количества модулей на систему неоднозначно.

Одним из самых существенных требований к модулям является обеспечение равенства масштаба формируемых изображений, для достижения которого модули должны удовлетворять условию:

$$f'_1 = f'_j = \dots = f'_N$$

где  $f'_1$  – фокусное расстояние 1-го модуля,  $f'_j$  – фокусное расстояние j-го модуля,  $f'_N$  – фокусное расстояние N-го модуля, N – число модулей (рисунок 1).

Важно также отметить, что собирающая свет поверхность входного зрачка системы из N модулей эквивалентна сплошной поверхности главного зеркала классического телескопа, диаметр  $D_3$  которого определяется формулой вида:

$$D_3 = \sqrt{\frac{1}{1 - \rho_3^2} \sum_{j=1}^N (1 - \rho_j^2) D_j^2}$$

где  $D_j$  – диаметр входного зрачка телескопического модуля j;  $\rho$  – коэффициент центрального экранирования.

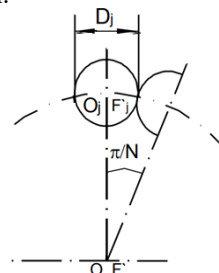


Рисунок 1 – Схема размещения модулей по окружности

Увеличение числа модулей позитивно влияет на предельную функцию передачи модуляции (ФПМ) системы, однако с увеличением числа N снижается максимально допустимая апертура отдельного модуля. Так, например, при диаметре описанной окружности 3 м, круглой форме входных зрачков и оптимальном варианте заполнения площади рассматриваемой поверхности, получим следующие соотношения активных площадей (таблица 3.1) В качестве допущения – промежутки между соседними модулями не учитываем, поскольку их влияние на качество изображения будет не существенным.

Таблица 1 – Зависимость активной площади апертуры от количества модулей

| Количество модулей, N | Площадь входного зрачка, м <sup>2</sup> |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| 5                     | 4,843465                                |
| 6                     | 4,712388                                |
| 7                     | 4,481468                                |

Анализ данных в таблице 1, показывает, что увеличение числа зеркальных модулей приводит к уменьшению площади входного зрачка системы по нелинейной зависимости.

Параметр технологичности в рассматриваемом случае двойственен: при увеличении числа модулей размеры и масса каждого отдельного элемента уменьшаются, что позволяет использовать более простые и надежные конструкции, однако вместе с тем значительно усложняется процесс их юстировки.

Вторым моментом является увеличенный разброс значений оптических (геометрических) параметров, что объясняется невозможностью технологически обеспечить 100 % повторяемость формы обрабатываемых отражающих оптических поверхностей для составных элементов.

Большее число модулей в конструкции в целом также способствует повышению надежности: выход из строя одного из модулей будет оказывать меньшее влияние на качество формируемого изображения, однако при этом общая вероятность поломки аппарата повышается.

Однозначно количество модулей влияет на экономичность – увеличение количества модулей снижает их стоимость.

По результатам исследований оптимальным числом модулей синтезируемой апертуры является  $N = 6$  (рисунок 2), гексагональное расположение дает удовлетворительный коэффициент заполнения апертуры, позволяет добиться малого допуска на разбежку фокусных расстояний.

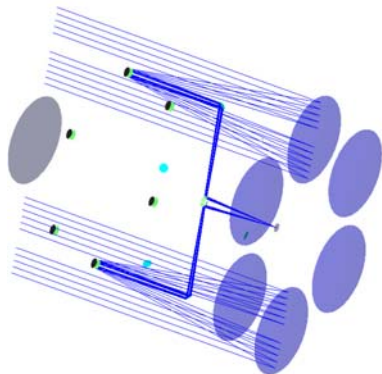


Рисунок 2 – Ход лучей в ТСА

Таким образом, были определены ключевые параметры ТСА, а также разработана оптическая схема ТСА состоящего из шести модулей, каждый из которых построен по схеме Кассегрена. Определены конструктивные параметры базового объектива ( $f = 13000$  мм,  $D = 800$  мм,  $\omega = 0,25^\circ$ ) и всего телескопа, отдаление оси модуля от оси ТСА составляет  $Y_{pos} = 1,2$  м.

#### Литература

1. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
2. Демин А.В. Математическая модель процесса анализирования композитных зеркал // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – СПб: НИУ ИТМО, 2015. – Т. 58, № 11. – С. 901–906.
3. Родионов С.А., Корепанов В.С., Еськов Д.Н. Бонштетт Б.Э. Проблемы апертурного синтеза. // Оптический журнал, № 10, 1995. – С. 17–25.

УДК 617.57-77

### СЕРВОПРИВОД ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПАЛЬЦЕВ БИОНИЧЕСКОЙ РУКИ

Соснина Л.А., Вяжевич Г.И., Кузнецов А.В. Фёдорцев Р.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Целью работы является проектирование электронной и механической части сервопривода непрерывного вращения для управления сжатием пяти механических пальцев «бионического протеза» руки.

В настоящее время широко используются «бионические» протезы, которые способны на большую часть повседневных действий. Все механизмы данного типа конструируются по одинаковому принципу управления электроникой и биотоками, то есть использования миографии или энцефалограммы. Самым весомым недостатком конструкций данного типа является цена. Кроме этого, обратная связь, позволяющая владельцу протеза получать информацию о качествах объекта, к которому он прикасается устройством в большинстве продуктов представленных на рынке слабо разработана, либо полностью отсутствует, т. е. требуется хирургическое вмешательство (вживление датчиков) в организм.

В результате изучения имеющихся недостатков, а также при условии отсутствия отечественных аналогов в Республике Беларусь было принято решение о создании белорусского конкурента на рынке искусственных рук, отвечающего основным критериям спроса белорусских потребителей.

Для белорусского потребителя доступны механические и косметические протезы. На рынке СНГ нашим основным конкурентом является компания «Моторика». Такие крупные компании как i-Limb, Touch Bionics (Шотландия), Titan Deutschland GmbH, HOSSUR (Исландия), BeBionic

не представлены, приобрести их продукцию можно только за рубежом.

В результате изучения имеющихся недостатков, а также при условии отсутствия современных отечественных аналогов в Республике Беларусь было принято решение о создании белорусского конкурента на рынке искусственных рук, отвечающего основным критериям спроса белорусских потребителей.

Актуальность разработки обусловлена отсутствием сервоприводов, которые обладают малыми размерами, высокой надёжностью и долговечностью. Также имеется ряд технических ограничений, которым не удовлетворяют имеющиеся в свободном доступе устройства, а именно:

- возможность получения управления, отличающегося высокой точностью и стабильным функционированием;
- широкий диапазон контроля скорости и ускорения;
- высокий уровень устойчивости к помехам;

Кроме того, устройство обладает двумя особенностями:

- способностью увеличивать вращающий момент;
- обеспечивать бесконтактную обратную связь.

Исходя из вышесказанного, был разработана собственная конструкция сервопривода, которая соответствует приведённым требованиям.

Сам сервопривод является связующим звеном между электронной схемой протеза (модулем регистрации мышечной активности и модулем управления) и его механической частью (паль-

цами). Он выполняет преобразование электрической энергии в механическую путём поворота выходного вала на определённый угол, определяемый модулем управления. Это делает его наиболее важным и ответственным элементом механической части протеза.

Так как в рассматриваемом проекте предполагается независимое управление пятью пальцами, это накладывает определённые ограничения на размер и конфигурацию устройства, так как оно должно уместиться в ладонь и в купе с механической оболочкой протеза иметь вес, не намного превышающий вес реальной кисти человека.

Кратко рассмотрим систему управления классического электронно-механического сервопривода, блок-схема которого изображена на рисунке 1 [1].



Рисунок 1 – Блок-схема сервопривода

Это устройство осуществляет поворот вала на определённый угол, который фиксируется при помощи системы обратной связи. Система контроля получает управляющие импульсы, частота которых стандартизирована и равна 50 Гц. Длина импульсов может меняться от 0,8 до 2,0 мс. Управление происходит следующим образом: переменный резистор, установленный в модуле преобразователя механически связан с валом двигателя через механический редуктор. Вращаясь, вал передаёт своё движение резистору, меняя его сопротивление. Полученное сопротивление изменяет уровень напряжения, которое передаётся модулю отслеживания поворота. Его главная задача – формирование опорного сигнала с фиксированной частотой 50 Гц и изменяемой шириной импульса. Поступающее с преобразователя напряжение изменяет длину импульса, а система контроля фиксирует это, сравнивая его с поступающим управляющим сигналом через компаратор. И в случае, когда длина опорных импульсов отличается от управляющих, система контроля подаёт сигнал драйверу двигателя, который подаёт напряжение на контакты двигателя и тем самым приводит вал в движение. А так как система замкнута, через механическую связь вал-резистор, то вращение происходит, пока опорный и управляющий сигналы не сравняются.

Данная система имеет ряд недостатков, которые делают её абсолютно непригодной для поставленной задачи: особенности механической части конструкции не позволяют осуществлять непрерывное вращение вала двигателя; переменный резистор,

который является основой стабильной работы привода, является электронно-механическим прибором и его проводящий слой подвержен износу; значительные габаритные размеры и усложнённая система управления; невозможность управления скоростью вращения вала.

Для достижения поставленной цели была проведена модернизация системы обратной связи и изменён общий подход к контролю вращения:

- переменный резистор был заменён на фотодатчик;
- в редуктор был добавлен оптический энкодер;
- полностью изменён концептуальный принцип управления и контроля.

Блок-схема модернизированного сервопривода показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Блок-схема сервопривода с оптической обратной связью

Особенностью данной системы является возможность бесконтактного контроля вращения, основанного на фиксировании прерывания светового потока. С этой задачей успешно справляется энкодер, который представляет собой шестерню с круглым отверстием. Таким образом, при повороте на угол 360° происходит засветка фотодиода, который входит в состав драйвера фотодатчика. Появившаяся фотоЭДС корректируется и подаётся на систему контроля, где контроллер анализирует положение выходного вала и отдаёт команду драйверу двигателя. Таким образом, осуществляется оптическая обратная связь.

В качестве оптического датчика применяется фотопрерыватель модели RPI-352. Это обусловлено следующим:

- малые габаритные размеры;
- размер фотоприёмной зоны 0,4 мм;
- номинальное напряжение питания 3,3 В;
- время срабатывания 10 мкс.

В соответствии с поставленной задачей была спроектирована 3D модель привода. Общий вид конструкции изображён на рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид сервопривода с оптической обратной связью

Отличительной особенностью этой конструкции является наличие червячной передачи (рис. 4)

и горизонтальное расположение двигателя. Это позволяет уменьшить общие габариты устройства, добавляя при этом механическое стопорение винта без лишнего энергопотребления.



Рисунок 4 – Червячная передача

Фотопрерыватель установлен у первой шестерни (рис. 5) так, что его оптическая ось совпадает с осью вращения сигнализирующего отверстия.



Рисунок 5 – Фотопрерыватель и фрагмент редуктора

Сам редуктор (рис. 6) является трёхступенчатым и имеет общее передаточное отношение 1:12.

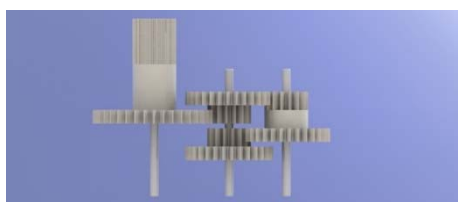


Рисунок 6 – Многоступенчатый редуктор

Спроектированное устройство имеет малые габаритные размеры, высокую точность и скорость срабатывания, пониженное энергопотребление и гораздо больший ресурс, в сравнении с классической конструкцией сервопривода.

УДК 621.384.326.23

**МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИЦЕЛА ТП-1 «ARGUS IR»**

**Ракевич П.С.<sup>1</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>2</sup>, Змитрович И.И.<sup>1</sup>, Фуфаев А.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «БелОМО – Минский механический завод имени С.И. Вавилова», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>УП «Научно-технический центр ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь

Тепловизионный прибор «Argus IR» на базе неохлаждаемого микроболометрического приёмника является пассивным наблюдательным прибором, который обеспечивает получение тепловых изображений объектов с высокой чёткостью в условиях дневной и ночной освещённости, а так же в условиях плохой видимости – сильного задымления, запыления, тумана и т. д. Прибор может исполнять свои функции в двух рабочих положениях.

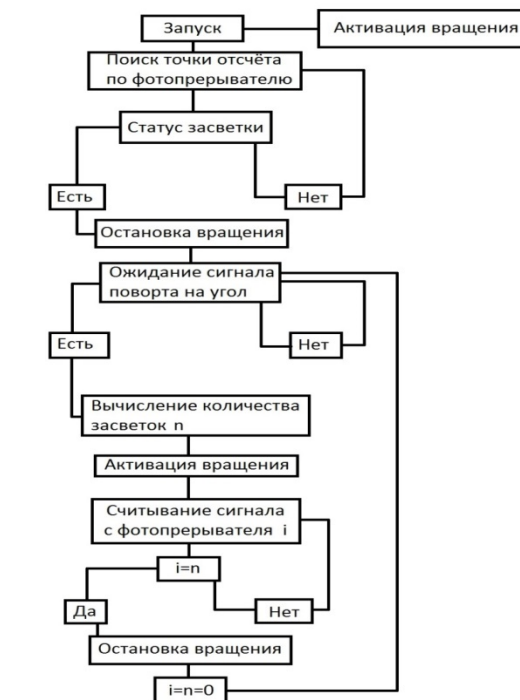


Рисунок 7 – Алгоритм вычисления угла поворота

На рисунке 7 представлен алгоритм, по которому контроллер отслеживает угол поворота выходного вала. Отличительной особенностью такого подхода к вычислению связан с тем, что в конечном устройстве, данных оптических сервоприводов будет использоваться не менее пяти. Алгоритм поддерживает подключение до 8 устройств одновременно, используя при этом минимальное количество вычислительных ресурсов контроллера.

**Литература**

Пуятин Н.Н. Радиоуправление моделями. М.: Энергия, 1976. – 64 с.

разъём 13 и в совокупности представляет собой пункт видеонаблюдения, для выполнения следующих задач:

- охраны промышленных объектов;
- поисково-спасательных работ по обнаружению людей и техники;
- увеличения эффективности авиационной и специальной техники по обнаружению очагов пожаров.

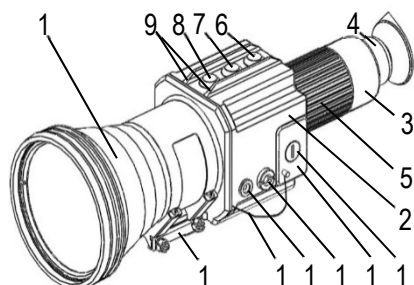


Рисунок 1 – Тепловизионный прицел ТП-1

Тепловизионный прибор управляется через системное меню, интерфейс которого контролируется тремя кнопками (6, 7, 8), расположенными на корпусе 2. Посредством программного обеспечения осуществляется автоматическая, полуавтоматическая или ручная настройка яркости и контраста изображения, отображается уровень заряда аккумуляторов, различные виды дальнометрических и прицельных сеток.

Применение микро-дисплея SVGA+ Rev 2 White OLED-XL (eMagin Corporation) позволило обеспечить высокое разрешение и яркость изображения, а при необходимости перейти на цветные экранные символы.

Открытая архитектура электронных модулей позволяет дополнить тепловизионный прибор вспомогательными устройствами, такими как лазерный дальномер, GPS, датчик угла наклона, датчик температуры, телевизионный канал и создать на его основе систему баллистических вычислений.

В тепловизионном прицеле реализованы следующие режимы работы, которые выводятся на экране меню (за пределами поля отображения объектов) (рисунок 2):

- калибровка (автоматическая встроенная);
- циклическое изменение цвета марки (белый/чёрный);
- регулировка (ручная) уровня контраста изображения для «горячих» и «холодных» объектов;
- регулировка (ручная и полуавтоматическая) усиления чувствительности изображения;
- фокусировка (ручная) изображения;
- ввод поправок для смещения марки в вертикальной и горизонтальной плоскости.
- На определение разрешающей способности тепловизионного прицела оказывает существенное влияние достаточно большое количество как внешних, так и внутренних факторов.

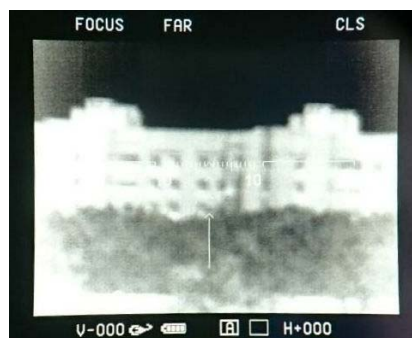


Рисунок 2 – Вид поля зрения и меню тепловизионного прицела ТП-1

Тепловое излучение ослабляется вследствие наличия в атмосфере молекулярного и аэрозольного рассеивания (дождя, снега, тумана, дымки и пр.). Наибольшее влияние и широкую полосу поглощения имеют следующие элементы (с максимальными пиками): вода (2,7; 3,2; 6,3 мкм), углекислый газ (4,8 мкм) и метан (3,2 и 7,8 мкм). На рисунке 3 представлены области пропускания атмосферы для рабочего спектрального диапазона тепловизионного прицела ТП-1  $\lambda = 7,0 \dots 14,0$  мкм.

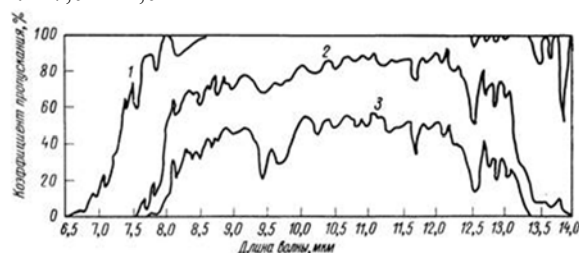


Рисунок 3 – Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 6,5–14 мкм (1 – трасса 300 м, толщина осажденной воды 0,11 см; 2 – трасса 6,3 км, толщина осажденной воды 1,37 см; 3 – трасса 18,7 км, толщина слоя осажденной воды 5,2 см)

Оптические компоненты тепловизионного прицела выполнены из монокристаллического германия ( $n = 4,0026$  на  $\lambda = 11$  мкм) с AR просветляющим покрытием, обеспечивающим минимальный коэффициент поглощения ( $\alpha < 0,027 \text{ см}^{-1}$  на  $\lambda = 10,6$  мкм) и интегральный коэффициент пропускания в пределах 0,87...0,97 во всём спектральном рабочем диапазоне (рисунок 4).

Изменение градиента температуры окружающей среды в диапазоне  $-30^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$  может быть компенсировано посредством подвижки объектива вдоль оптической оси в пределах 1,0...0,6 мм.

На разрешающую способность существенное влияние оказывают также геометрические характеристики и качество изготовления самих оптических компонентов фокусирующего объектива. В таблице 1 приведены расчётные значения размера изображения на приёмной микроболометрической матрице при различных размерах наблюдаемого объекта.



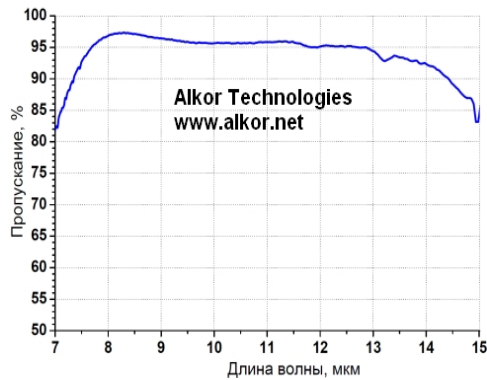


Рисунок 4 – График зависимости пропускания объектива с оптическими компонентами из германия в рабочем спектральном диапазоне

Таблица 1 – Полихроматические коэффициенты передачи модуляции

| Пространственная частота в плоскости матрицы, лин/мм | Полихроматические коэффициенты передачи модуляции (расчетные) (поз.1,2,3) |                   |      |                   |      |                  |      |  |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-------------------|------|------------------|------|--|
|                                                      | $y=0$                                                                     | $y=5,04\text{мм}$ |      | $y=6,72\text{мм}$ |      | $y=8,4\text{мм}$ |      |  |
|                                                      | -                                                                         | мер.              | соз. | мер.              | соз. | мер.             | соз. |  |
| 7,0                                                  | 0,82                                                                      | 0,83              | 0,82 | 0,82              | 0,82 | 0,82             | 0,81 |  |
| 14                                                   | 0,72                                                                      | 0,73              | 0,72 | 0,72              | 0,71 | 0,71             | 0,69 |  |

В базовом варианте конструкции прицела ТП-1 используется микроболометрическая матрица модели UL 03 04 1 – 384×288 pix LWIR («ULIS» Франция) с размерами приёмной площадки и размером светочувствительных элементов 35 мкм [1].

На основании критериев Джонсона [2] разработана математическая модель тепловизионного прицела, позволяющая оценить вероятность обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения в зависимости от горизонтальных и вертикальных углов обзора, а также размеров и числа элементов на матрице приёмника изображения.

Для практической оценки разрешающей способности тепловизионного прицела проведена серия полевых (полигонных) испытаний в соответствии с разработанной методикой.

Объектами наблюдения являлись два или три человека в полный рост (высота 1,7 м и ширина

0,5 м) в солдатских шинелях или камуфляжной форме стоящие рядом друг с другом на открытой местности с зеленым травяным покровом. Высота травы – не более 0,3 м. Объекты наблюдения полностью проецировались на фон. Расстояние от местных предметов до объектов наблюдения по фронту составляло не менее 10 м.

Наблюдение проводили поочередно не менее трех наблюдателей. Считалось, что прицел соответствует требованиям, установленным в техническом задании, если каждый из наблюдателей правильно указал направление вытянутой руки или количество объектов наблюдения (таблица 2). Время наблюдения для одного человека должно быть не более 15 с (регистрировалось секундомером СОСпр-26-2-000 ТУ 25-1894.003).

Таблица 2 – Критерии оценки соответствия

| Дальность    | Расстояние до объекта наблюдения | Критерий оценки                |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Расознавания | 800 м                            | Направление вытянутой руки     |
| Обнаружения  | 1500 м                           | Количество объектов наблюдения |

Как показывают проведенные численные исследования конструктивная модернизация тепловизионного прицела на предмет замены микроболометрической матрицы на модель с большим числом элементов 640×480 pix и размером одного элемента 17 мкм (например, Pico640 Gen2™ ULIS) позволит примерно в 2 раза повысить разрешающую способность всей оптической системы прибора.

### Литература

1. ULIS PROPRIETARY. UL 03 04 1 / 384 x 288 LWIR UNCOOLED MICROBOLOMETER. NTC 07012-6/ Issue 6 – 27.08.07. – 23 p.
2. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.

УДК 780.6:535.8

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕДАЛИ ЗВУКОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭНКОДЕРА

Седун Д.Н., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В процессе студийной записи музыкальных инструментов, а также в ходе проведения концертов активно применяются специальные компактные электронные устройства, предназначенные для создания различных звуковых эффектов: коррекция амплитудно-частотной характеристики, изменение динамического диапазона, увели-

чение длительности звучания ноты, создание перегруженного звучания при котором происходит жесткое амплитудное ограничение.

Педали эффектов предназначена для преобразования входного сигнала, поступающего со струнного инструмента (электроргитара, электровиолончель, электроскрипка), клавишного ин-

струмента (синтезатора), барабанов или обычного вокала в выходной посредством электронного блока, построенного на базе резисторов, конденсаторов, транзисторов, интегральных микросхем или вакуумных ламп. Вследствие применения педали эффектов обеспечивается, например, возможность насыщения звука гитары большим количеством обертонов (за счёт обратной связи), а также чётных (в случае ламп) и нечётных (в случае транзисторов) гармоник.

На сегодняшний день блоки эффектов и конкретным модели производителей можно разделить на следующие виды: «Wah-wah» – изменение амплитудно-частотной характеристики (Morley Bad Horsie/AMT WH-1); «Pitch-shifter» – изменение высота тона (Digitech Whammy/Morfeus Bomber); «Pedal expression» – изменение любого из контролируемых параметров (Roland EV-5); «Volume pedal» – изменение динамического диапазона (Morley EOV Optical Volume/AMT LM-2) [1].

Создание подобного рода эффектов становится возможным благодаря введению задержки (latency) звуковой волны. Человек способен будет различать звуки, как отдельные, если между ними прошло от 20 мс до 30 мс. Если один звук отстоит от другого на интервал менее 10 мс, то большинство людей будут думать, что звук вовсе не прерывался. На интервале от 12 мс до 15 мс, человек не способен различить два отдельных звука, но будет это чувствовать, что что-то не так. Конкретные цифры будут индивидуальны для каждого человека, определяются возрастом и генетической предрасположенностью к музыке, а также другими физиологическими особенностями [2].

Ключевым элементом конструкции является устройство регулировки динамического звукового диапазона. При использовании классического механического потенциометра с графитовой дорожкой обеспечивается плавное изменение уровня звукового потока, однако постоянный механический контакт приводит к быстрому износу сопрягаемых частей, плохой пыли- и влагозащищённости и требует проведения периодического технического обслуживания, предусматривающего смазку зубчатого зацепления. Перечисленные выше недостатки устраняются вследствие применения оптического линейного прерывателя на базе энкодера.

Педаль эффектов Digitech Whammy с оптической регулировкой уровня звукового сигнала (рисунок 1) [3] конструктивно состоит из прямоугольного металлического (или пластикового) корпуса 1, внутри которого размещены: подвижный шарнир в виде оси 2, подпружиненный рычаг 3, переключатель положения типа настраиваемых внешних эффектов 4, собственно электронный блок управления, на плате которого установлен оптический энкодер, входные 5 и

выходные 6 разъёмы подключения внешних устройств, а также кнопку включения/отключения 7.



Рисунок 1 – Педаль эффектов Digitech Whammy 4

Дифференциальный датчик положения включает оптопару: излучающий светодиод (например, LEDR701902) и приёмник на основе фототранзистора (например, LPT-80A OSRAM) между которыми размещается полусферическая пластина из ударопрочного прозрачного пластика с градиентным покрытием и нанесённой кодировочной сеткой чёрно-белых элементов [2]. Фотоприёмник рассчитан на работу в видимом и ближнем ИК спектральном диапазоне (450...1100 нм), при этом максимум чувствительности приходится на  $\lambda = 950$  нм [4]. Угловое поле системы составляет  $70^\circ$ , что позволяет перекрыть участок поверхности пластины в пределах 5 мм.

Кодировочная маска на пластину толщиной  $s = 0,8$  мм и шириной  $b = 10$  мм нанесена методом фотолитографии и представляет собой распределённый массив из набора линейных круглых и квадратных элементов, с равномерно возрастающим размером от 0,05 до 0,35 мм (рисунок 2).

Точность работы педали звуковых эффектов, построенной на базе оптического энкодера в большой степени будет зависеть от внешних условий её эксплуатации (студия звукозаписи или открытая уличная площадка). Так, например высокая запылённость помещения, а также мелкие механические частицы, такие как песок, опилки и т.п. в сочетании с повышенной влажностью воздуха приводят к налипанию на поверхности оптической пластины посторонних элементов и как следствие к ложному срабатыванию оптического приёмника.

Принцип работы педали эффектов поясняет структурно-функциональная схема (рисунок 3). Уровень входного сигнала проходит 3-х каскадный усилитель и попадает на контроллер, который формирует два сигнала. Первый проходит в исходном виде через переключатель BYPASS/DRH\_OUT, второй – через оптический энкодер. В процессе движения рычага и жёстко связанной с ним полусферической пластины фотодетектор считывает (в режиме негатива) количество засвеченных рядов кодовых элементов.

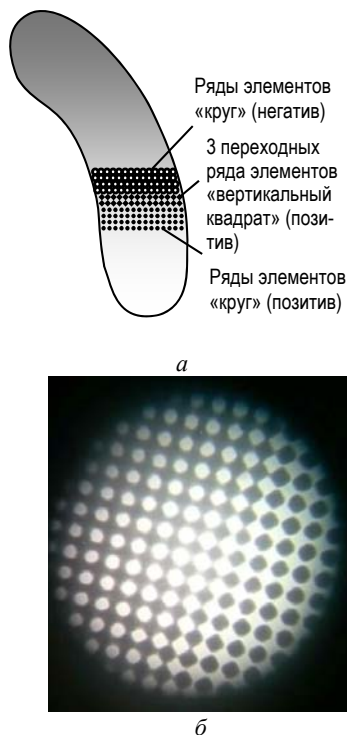


Рисунок 2 – Кодировочные элементы на поверхности пластины: а – зоны распределения; б – фрагмент визуализации перехода

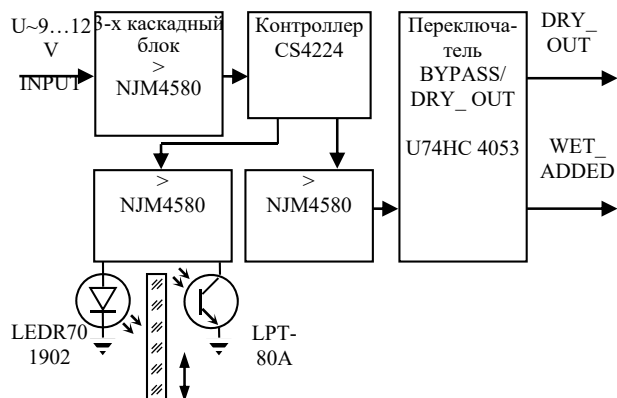


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема педали эффектов

Для предотвращения указанных недостатков в конструкции педали необходимо предусмотреть войлочный уплотнитель, обеспечивающий самоочистку поверхности подвижной части пластины, а также выполнять периодическое техническое обслуживание всех элементов устройства.

На рисунке 4 представлен усовершенствованный вариант конструкции педали эффектов для электрогитары.

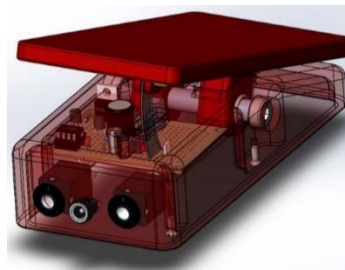


Рисунок 4 – Вариант оптимизированной конструкции педали эффектов

Конструкция отличается большей компактностью. Входные и выходные гнезда подключения выполнены в верхней торцевой части корпуса. Для повышения универсальности и ремонтпригодности крепление прозрачной пластины с кодировочной маской осуществляется винтовым соединением. С целью повышения точности срабатывания оптического энкодера нанесение сетки элементов предлагается выполнять методом лазерной гравировки фемтосекундным лазером.

### Литература

1. Yakabuski, Jim. Professional Sound Reinforcement Techniques: Tips and Tricks of a Concert Sound Engineer. – Hal Leonard, 2001. – P. 139.
2. Studio / Задержка звука (latency). CraSS. Россия. Санкт-Петербург. <http://jablog.ru/blog/studio-1/4148.html>
3. DigiTech. Harman Signal Processing. Whammy. Owner's Manual. USA. – 20 p. 5021752-B [www.digitech.com](http://www.digitech.com)
4. Published by OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Silicon NPN Phototransistor. Version 1.1 LPT 80A. Mouser Electronics. 14.01.2014. – 11 p.

УДК 552.578.2.061:528.8.04

## ОРБИТАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ

Силие Куэнка А.Р.<sup>1,2</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск Республика, Беларусь

<sup>2</sup>Национальный центр оптических технологий, Мерида, Венесуэла

Нефть как основной энергетический и экономический источник считается сегодня самым важным сырьевым ресурсом цивилизации, и стал в современном мире одним из стратегических продуктов, который составляет основу развития и прогресса планеты.

Организация стран-экспортеров нефти (ОПЕК) оценила, что мировой спрос на нефть к 2040 году вырастет до 111,7 млн. баррелей в сутки, увеличившись на 14,5 млн. баррелей в сутки по отношению к 2017 году. В 2040 году доля нефти как источника энергии будет со-

ставлять 28 % от общего мирового потребления всех видов, а в течение следующих двух десятилетий ожидается, что на ископаемое топливо будет приходиться 75 % общего потребления энергии [1]. Эти статистические данные позволяют нам понять важность углеводородного сектора для поддержания мирового спроса на энергию.

Использование новых методов разведки на основе анализа данных спутниковых изображений, позволяют выполнять геологоразведочные работы более экономичным и эффективным способом.

Современное развитие оптических технологий способствует созданию новых оптических систем съёмочной аппаратуры для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), работающих в более широком спектральном диапазоне длин волн и с более высоким фотографическим разрешением.

Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата (КА), характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы. Поэтому на КА используется многоканальное оборудование пассивного и активного типов, регистрирующие электромагнитное излучение в различных спектральных диапазонах. **Пассивные** методы, наиболее распространённые – основаны на использовании естественного отражения солнечного излучения от поверхности Земли или вторичного теплового излучения объектов на её поверхности. В то время как **активные** методы используют вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия.

По данным ООН картами масштаба 1: 100000 покрыто только 44 % суши, 1: 50 000 – не более 50 %, 1: 25 000 – не более 20 %. На остальные участки карты либо отсутствуют, либо не соответствуют действительности.

Для съёмки земной поверхности с авиационных и космических аппаратов используются следующие диапазоны волн:

- видимый диапазон 0,4–0,8 мкм;
- ближний инфракрасный диапазон 0,8–1,5 мкм;
- тепловой инфракрасный диапазон 3,5–5,0 и 8,0–14,0 мкм;
- сверхчастотный радиодиапазон 0,3–100 см [2].

Наибольшее распространение получили следующие системы формирования изображений.

**Система камер видикон возвратного луча** (The Return-Beam Vidicon, RBV) была разработана в США в рамках реализации спутниковой программы Landsat-1...3 (1972) для получения мультиспектральный изображений с высоким пространственным разрешением.

Система включает три совмещенные телевизионные камеры, по одной для каждой спектральной полосы: полоса 1 – сине-зеленая; полоса 2 – желто-красная; полоса 3 – инфракрасная

(NIR). Измерения RBV отраженной солнечной радиации проводились только при дневном свете. Три ориентированные на землю камеры были установлены на общую базу, которая была структурно изолирована от космического корабля для обеспечения точного выравнивания. Каждая камера содержала объектив (5,08 см), термоэлектрический охладитель, катушки отклонения и фокусировки, механический затвор, стирающие лампы и электронную часть датчика. Камеры были аналогичны, и отличались только спектральными фильтрами, содержащимися в объективах, обеспечивающими заданный спектральный рабочий диапазон длин волн [3].

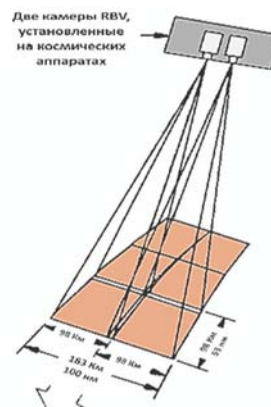


Рисунок 1 – Система RBV с двумя параллельно работающими камерами

Две параллельно смонтированные камеры могут работать в нескольких режимах. Первый (параллельный) – каждая камера обеспечивает формирование двух смежных изображений (рис. 1). Второй (синхронный) – каждая камера, обеспечивает формирование единого кадра (рис. 2).

На первом этапе камеры RBV не работали должным образом и создавали электронные помехи для бортового оборудования спутников.

**Мультиспектральный сканер** (multispectral Scanner, MSS) разработан SBRC, состоит из телескопа с двойным отражателем, сканирующего зеркала, фильтров, детекторов и блока электроники. Сканирование осуществляется вертикально, строго в надири, поперек направления полёта спутника (рис. 3).

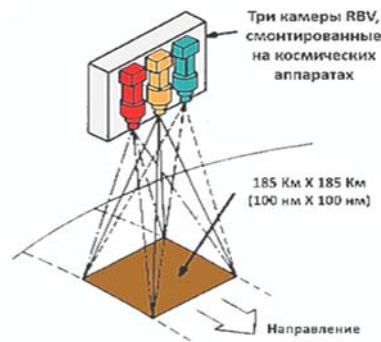


Рисунок 2 – Система RBV с тремя синхронно работающими камерами



Рисунок 3 – Схема мультиспектрального последовательного сканирования

На поверхности Земли захватывается полоса шириной 185 км. Съёмка проводится в четырех спектральных диапазонах, мкм: I. 0,50–0,60 (зеленый); II. 0,60–0,70 (красный); III. 0,70–0,80 (ближний инфракрасный); IV. 0,80–1,10 (ближний инфракрасный). Разрешение на местности при этом составляет 80 м для оптического диапазона и 240 м для инфракрасного диапазона. Масштаб изображения (приведенный) – 1:400000.

**Тематический картограф** (Thematic Mapper, TM) разрабатывался в рамках программы Landsat искусственных спутников Земли с 1999 года по настоящее время. Ширина полосы захвата изображения на местности аналогична MSS и составляет 185 км. Сканирование осуществляется в семи спектральных зонах, мкм: I. 0,45–0,52 (синий); II. 0,52–0,60 (зеленый); III. 0,63–0,69 (красный); IV. 0,76–0,90 (ближний инфракрасный); V. 1,55–1,75 (инфракрасный); VI. 2,08–2,35 (инфракрасный); VII. 10,4–12,4 (тепловой). Пространственное разрешение на местности для первых пяти и седьмого каналов составляет 30 м и 120 м для шестого канала. Масштаб изображения (приведенный) – 1:150000 (для шестого канала – 1:600).

УДК 681.723.078, 681.775.078, 681.777.078

## ТОЧНОСТЬ КРОСКОРЕЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

Старосотников Н.О.<sup>1,2</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> ОАО «Пеленг», Минск, Республика Беларусь

В основе математической обработки данных автоколлиматоров, звёздных датчиков, датчиков Шака-Гартмана, схем геометрической калибровки оптико-электронных приборов, различных следящих систем лежит определение координат изображения, спроецированного на фотоприёмник оптико-электронного прибора. При наличии на фотоприёмнике некоего паразитного изобра-

Китайская корпорация Great Wall Industry 9 октября 2017 года осуществила вывод на орбиту второго венесуэльского спутника для ДЗЗ – VRSS-2 (рис. 4). Космическую программу профинансировало Венесуэльское правительство в поисках решений многих социальных, политических, экономических и экологических проблем страны.



Рисунок 4 – Спутник VRSS-2 (Венесуэла)

VRSS-2 основан на платформе CAST-2000 и имеет два инструмента в качестве полезной нагрузки. Камера PMC (PAN и мультиспектральная камера) способна захватывать мультиспектральные изображения (RGB, NIR) с разрешением 4 метра и панорамические изображения с разрешением один метр. Ширина развертки PMC составляет 57 километров. Камера WMC (Wide Swath Multispectral Camera) имеет четыре полосы спектра, две в коротковолновом инфракрасном (SWIR) с разрешением 30 метров и два в инфракрасном диапазоне с разрешением 60 метров с шириной развертки 370 километров. Спутник находится на низкоземной орбите: 634,6 км (перигей) и 663,7 км (апогей) с периодом обращения 97,6.

### Литература

1. World Oil Outlook 2040. Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC), 2018. – 412 p. <https://woo.opec.org/>
2. Гарбук С.В., Гершензон В.Е., Космические системы дистанционного зондирования земли. М : А и Б, 1997. – 296 с.
3. RBV. Sensor Description. Sensor Performance, Products and Algorithms (SPPA). ESA Responsible Ferran Gascon. 19.05.2015. <https://earth.esa.int/>

жения обычные методы определения координат изображения, спроецированного оптической системой измерительного прибора не будут работать [1, 2]. В таком случае, при наличии паразитного изображения, можно использовать кросскорреляционный алгоритм [3, 4]. Суть данной работы заключается в оценке точности кросскорреляционного алгоритма.

**Моделирование изображения.** В основе исследований заложена математическая модель распространённой схемы контроля, которая описана в работе [1], с параметрами, описанными в работе [2]. Смоделированный тест-объект проецируется объективом коллиматора в оптико-электронный прибор, объектив которого формирует изображение на фотоприёмнике. В модели данные явления математически описаны операцией свёртки функции, задающей рисунок тест-объекта, и функции рассеяния точки объектива с наименьшим диаметром функции рассеяния точки. В модели учитывались следующие шумы, характерные для современных промышленных цифровых камер: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственная неоднородность элементов фотоприёмника. Для снижения влияния шумов применялся фильтр Винера, а также вводился порог, значения яркости ниже которого принимались равными нулю. Данные меры повышают точность расчёта центра тест-объекта.

**Формирование шаблона** осуществлялось по серии из 100 изображений. Изображения отличались наличием шумов случайного характера. Шаблон формировался путём усреднения значе-

ний интенсивности в каждом пикселе. Таким образом, формировался шаблон, с минимизированным влиянием на него шумов.

Выполнялось смещение изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Из-за дискретности фотоприёмника и шумов расчёт смещения не соответствовал заданному смещению. Данная погрешность определяет точность кросскорреляционного алгоритма определения центра изображения. Погрешность является периодической и систематической. Максимум погрешности приходится на 0,5 пикселя смещения изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника, минимум – на 0 и 1 пикселя. Однако, погрешность также носит случайный характер, поскольку неизвестно первоначальное расположение изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника, и кроме как при математическом моделировании, невозможно предварительно её исключить, поэтому стоит задача в её исследовании, поиске оптимального размера диаметра тест-объекта, других способов математической обработки для уменьшения погрешности.

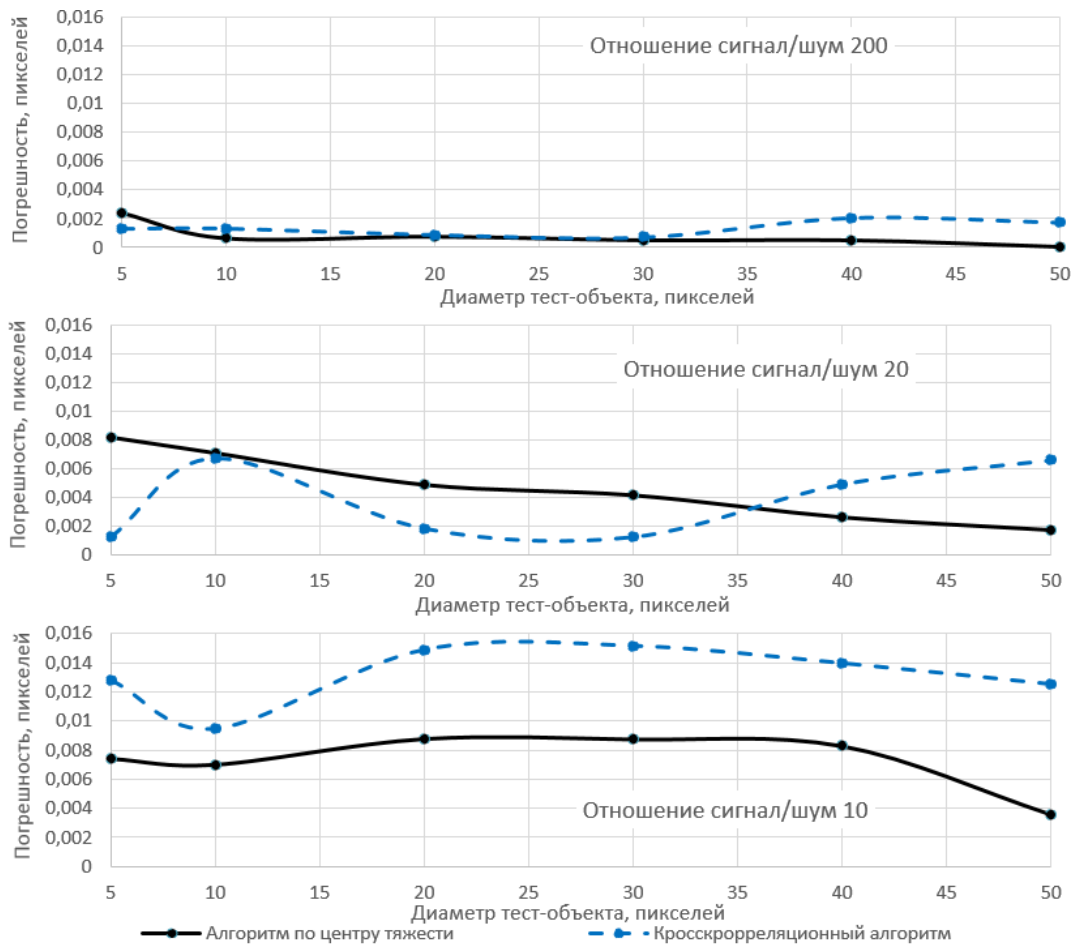


Рисунок 3 – Погрешность (ось ординат, пикселей) определения центра изображения тест-объекта на фотоприёмнике кросскорреляционным алгоритмом и только алгоритмом определения центра тяжести для различных диаметров тест-объекта (ось абсцисс, пикселей)

Между обрабатываемым изображением со смещённым тест-объектом и шаблоном **определялась кросскорреляционная матрица** по формуле:

$$I_{cc_{u,v}} = \frac{\sum_{x,y} (f(x,y) - \bar{f}_{u,v}) (t(x-u, y-v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x,y) - \bar{f}_{u,v})^2 \sum_{x,y} (t(x-u, y-v) - \bar{t})^2}}$$

где  $f$  – исследуемое изображение с тест-объектом;  $\bar{t}$  – среднее значение шаблона;  $\bar{f}_{u,v}$  – среднее значение  $f(x, y)$  в области под шаблоном [3, 4]. По полученной кросскорреляционной матрице **определялись координаты центра тяжести** по следующей формуле:

$$Cx, Cy = \frac{\sum_{u=1} \sum_{v=1} I_{cc_{u,v}} \cdot u, v}{\sum_{u=1} \sum_{v=1} I_{cc_{u,v}}}$$

где  $I_{cc_{u,v}}$  – степень корреляции в ячейке  $u, v$  кросскорреляционной матрицы.

Численные исследования проводились на основе разработанной математической модели. Произведён расчёт погрешности определения координат центра тяжести, для тест-объектов различных диаметров: 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикселей фотоприёмника, а также значений отношения сигнал/шум: 200, 20, 10. Расчёт производился в программном пакете MATLAB для выборки, состоящей из 100 изображений, для каждого диаметра тест-объекта. Изображения отличались друг от друга случайным характером шумов фотоприёмника. По каждому изображению определялся центр тяжести. Задавалось смещение тест-объекта на 0,5 пикселя и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещением тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Затем значения погрешности усреднялись по всей выборке с учётом весов. Полученные средневзвешенные результаты зависимости погрешности определения центра

изображения тест-объекта на фотоприёмнике от диаметра тест-объекта для кросскорреляционного алгоритма и только алгоритма определения центра тяжести представлены на рисунке 1.

**Выводы** по особенностям применения кросскорреляционного алгоритма для поиска координат центра изображения по сравнению с алгоритмом по центру тяжести:

1. Кросскорреляционный алгоритм требует в 18 раз больше по времени вычислительных ресурсов.

2. Для отношения сигнал/шум более 20 и для диаметра тест-объекта менее 30 пикселей точность кросскорреляционного алгоритма сравнима с точностью алгоритма по центру тяжести.

3. При наличии на фотоприёмнике паразитных изображений, возможно применение только кросскорреляционного алгоритма.

### Литература

1. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприёмниками. // Журнал «Наука и техника». – 2015. – № 5. – С.71–76.

2. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах. // Журнал «Наука и техника». – 2018. – № 17(1) – С. 79–86. DOI:10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86.

3. Jae-Chern Yoo, Tae Hee Han. Fast Normalized Cross-Correlation / Circuits, Systems and Signal Processing. (2009) 28: 819. DOI:10.1007/s00034-009-9130-7.

4. Haralick, Robert M., and Linda G. Shapiro, Computer and Robot Vision, Volume II, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1992, pp. 316–317.

УДК 762.8:621.787

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

Федорцев В.А., Власенко Е.П.

ООО «Интеллектуальные процессоры», резидент НТП БНТУ «Политехник» Минск, Республика Беларусь

Высокое качество изделий в машино- и приборостроении может быть обеспечено для ряда ответственных деталей и специальной технологической оснастки, изготавливаемых из сталей и железоуглеродистых сплавов, только за счёт получения на их рабочих поверхностях износостойких покрытий из порошковых материалов.

В работе [1] предложен способ получения покрытий из самофлюсующихся твёрдых сплавов системы Ni–Cr–B–Si газотермическим напылением с последующим их оплавлением лазерным лучом

для обеспечения монолитного сцепления полученного слоя с основой изделия, чтобы избежать объёмного разогрева всей детали. Высокие скорости нагрева и охлаждения покрытия, имеющие место при лазерной обработке, способствуют также формированию специфической мелкозернистой структуры покрытия с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Однако существенным недостатком рассматриваемого способа является объёмный разогрев упрочняемой поверхности на первой стадии про-

цесса при газотермическом напылении порошкового материала, который может привести к короблению изделий, особенно тонкостенных, в виде листов, полос и т. д. Кроме того в производственных условиях имеют место повышенные затраты на техническое осуществление самого процесса газотермического напыления и образование негативных побочных факторов экологического характера.

Одним из вариантов усовершенствования рассматриваемого метода упрочнения поверхностей металлических изделий может быть способ получения покрытий на деталях ферромагнетиков Fe-Va и Fe-Ti за счёт химических реакций и механического перемешивания расплава на поверхности детали и материала ферропорошка находящихся в магнитном поле [2]. Однако в процессе перемешивания формируется переходный слой с низкими физико-механическими свойствами при достигаемой толщине электромагнитных покрытий 400–600 мкм. Указанной толщины недостаточно для обеспечения необходимого припуска на осуществление окончательной механической обработки.

Для устранения рассматриваемого технологического недостатка осуществляется, например нанесение покрытия на упрочняемую поверхность шликера с клеевой составляющей и последующее воздействие на модифицированную поверхность сфокусированного лазерного излучения.

Однако вследствие этого процесса на поверхности покрытия появляется повышенная пористость и шероховатость, которая возникает в результате испарения и газообразования клеевой составляющей шликера, а также в ходе выгорания связки на границе в зоне проплавления. Данное обстоятельство не позволяет наличие таких дефектов на поверхности для таких деталей, как матрицы и пуансоны, используемые при производстве стеклянных и пластмассовых изделий. Рассматриваемый метод нанесения покрытий находит применение только в ремонтном производстве для случаев упрочнения локальных участков восстанавливаемых поверхностей, например гнёзда под клапана в двигателях. При этом испарение клеевой составляющей шликера в процессе его оплавления лучом лазера отрицательно влияет на экологическую составляющую рабочего места.

Авторами данной работы предложен метод формирования упрочняющих покрытий на металлических изделиях с высоким уровнем износостойкости и низкой шероховатостью поверхностного слоя.

Первоначально на поверхность основы детали наносят смесь порошков: 50–70 % ферромагнитного (железо-ванадий) и 50–30 % никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 (ГОСТ 21448-75). Твёрдость не менее 55,9 HRC. Фрак-

ционный состав 40-100-160 мкм. Применение мелких частиц приводит к более интенсивному окислению и их частичному выгоранию. Кроме того, при их использовании часто забивается сопло плазмотрона. Далее на металлическое изделие накладывают постоянное магнитное поле с индукцией 1,0–1,8 Тл.

Использование смеси при содержании ферромагнитного сплава «железо-ванадий» (Fe-Va) в количестве 50–70 мас. %, обеспечивает (при постоянном наложении на изделие магнитного поля с магнитной индукцией 1,0–1,8 Тл в зоне обработки) образование устойчивого «каркаса-сетки» из частиц ферромагнетика, который удерживает остальные частицы на упрочняемой поверхности изделия в процессе обработки.

Количество частиц порошка ферромагнетика Fe-Va менее 50 мас. % уменьшает удерживающую способность этого каркаса даже при верхнем значении заявленного предела магнитной индукции в зоне обработки.

Количество частиц порошка ферромагнетика Fe-Va более 70 мас. % резко уменьшает содержание никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 в составе шликера, что сказывается на износостойкости формируемого покрытия.

Использование уровня магнитной индукции менее 1,0 Тл не обеспечивает достаточную жёсткость формируемого «каркаса-сетки» для удержания смеси порошка в процессе лазерной обработки и увеличения уровня магнитной индукции выше заявленного значения. В тоже время уровень магнитной индукции выше 1,8 Тл не обеспечивает повышения эффективности процесса упрочнения, и лишь увеличивает затраты электроэнергии.

Градиент температуры в зоне воздействия лазерного излучения на участок нанесённого слоя смеси порошков не превышает точку Кюри и сохраняет магнитные свойства поверхности, что позволяет удерживать частицы ферромагнитного порошка в процессе упрочнения.

В ходе проведения практических экспериментов осуществлялась обработка технологических режимов. В качестве образцов использовались пластины из стали 20 диаметром 20 мм и толщиной 12 мм, предварительно очищенные дробеструйной обработкой от загрязнений и окисных плёнок. На поверхность образцов насыпали смеси порошков ферромагнитного сплава Fe-Va и никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 толщиной 0,8–1,0 мм (таблица 1).

На данные образцы со слоем смеси порошков накладывали постоянное магнитное поле с помощью специального устройства, имеющего плоский магнитный полюсный наконечник и используемого для магнитно-абразивного полирования, которое в целом позволяло создавать на изделии магнитное поле с магнитной индукцией 0,8-2,0 Тл в зоне обработки. Слой смеси порош-



ков на образцах подвергали воздействию непрерывного лазерного излучения на установке ЛГН-702 «Кардамон» (Россия) (таблица 2) [3].

Таблица 1 – Химический состав сплава ПГ-СР4

| Наименование вещества  | Процентное содержание, % |
|------------------------|--------------------------|
| <i>Основные</i>        |                          |
| Углерод                | 0,6 – 1,0                |
| Хром                   | 15,0 – 18,0              |
| Кремний                | 3,0 – 4,5                |
| Бор                    | 2,8 – 3,8                |
| Железо                 | не более 5,0             |
| <i>Вспомогательные</i> |                          |
| Сера                   | 0,04                     |
| Фосфор                 | 0,04                     |

Таблица 2 – Основные технические характеристики лазера модели ЛГН-702

| Наименование параметра              | Численное значение                       |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| Активная среда                      | СО <sub>2</sub> (с продольной прокачкой) |
| Рабочая длина волны                 | 10,6 мкм                                 |
| Мощность излучения                  | 800±5 Вт                                 |
| Скорость перемещения лазерного луча | 20, 15, 10 и 5 мм/с                      |
| Мода генерации                      | К <sub>0</sub> =0,08                     |
| Угловая расходимость                | 3 мрад                                   |

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

| № образца | Состав смеси порошков, масс.% |        | Магнитная индукция в зоне обработки, Тл | Ra, мкм | Пористость, % | Величина износа, мкм |
|-----------|-------------------------------|--------|-----------------------------------------|---------|---------------|----------------------|
|           | Fe-Va                         | ПГ-СР4 |                                         |         |               |                      |
| 1         | 40                            | 60     | 0,8                                     | 35      | 10            | 9,5                  |
| 2         | 50                            | 50     | 1,0                                     | 25      | 5             | 5,5                  |
| 3         | 60                            | 40     | 1,4                                     | 20      | 4             | 5,0                  |
| 4         | 70                            | 30     | 1,8                                     | 26      | 6             | 5,5                  |
| 5         | 80                            | 20     | 2,0                                     | 40      | 12            | 7,5                  |

Режимы обработки: скорость перемещения лазерного луча – 200 мм/мин, диаметр лазерного луча – 2,5 мм и коэффициент перекрытия дорожек лазерной обработки – 0,8 обеспечивали про-

плавление слоя смеси порошков на упрочняемых образцах.

Обработанную лучом лазера поверхность образцов I-го типа оценивали по параметру шероховатости Ra на профилографе–профилометре модели 252, а затем шлифовали и полировали, чтобы оценить пористость покрытия с помощью микроскопа МИМ-8М в поляризованном свете. Обработанную лучом лазера поверхность образцов II-го типа после шлифования проверяли на износостойкость на машине торцового трения. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3.

Испытания образцов на износостойкость проводили на следующих режимах: давление P = 1,24 МПа, скорость скольжения V = 2 м/с, время испытаний – 3 часа, среда – масло индустриальное 20. Контртело – трубки из твердого сплава ВК-8.

Предложенный способ получения износостойких покрытий на металлических изделиях обеспечивает значительное снижение шероховатости и пористости формируемых покрытий при сохранении высокого уровня износостойкости упрочненного слоя изделий.

Выход за пределы предложенного состава смеси порошков и магнитной индукции в зоне обработки приводит к возрастанию шероховатости и пористости покрытия, а также увеличивает износ образцов.

#### Литература

1. Кардополова М.А., Спиридонов Н.В., Станкевич О.Н. Влияние режимов лазерной обработки на микроструктуру // *Машиностроение: Республ. Межвед. сб. – Вып. 10. – Мн. : Выш. школа, 1985. – С. 120.*
2. P. Roupová, O. Schneeweiss. Preparation and analysis of Fe-Zr, Fe-Ti, and Fe-V composites for hydrogen storage. *Materials Structure*, vol. 18, № 3. – 2011. – P.218–219.
3. Алейников В.С., Беляев В.П. и др. Лазерная установка «Кардамон» // *Электронная промышленность, 1981. – № 5–6. – С. 39–51.*

УДК 535.339; 621.317

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

На протяжении многих лет ученых привлекает идея создания светоизлучающего диода совместимого с технологией производства кремниевых интегральных схем. Наиболее перспективными материалами активных сред разрабатываемых светоизлучающих структур на основе кремния являются оксид (SiO<sub>x</sub>), нитрид (SiN<sub>x</sub>) и

оксинитрид (SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>) кремния. Спектроскопия электролюминесценции (ЭЛ) является ключевой методикой, позволяющей определить пригодность разрабатываемых структур для создания на их основе приборов кремниевой оптоэлектроники. Метод ЭЛ обладает высокой чувствительностью к наличию дефектов и примесей и позволя-

ет получать не только информацию о составе, строении и структурных особенностях диэлектрических слоев, но и оценивать влияние дефектов и примесей на процессы переноса носителей заряда под действием электрического поля [1].

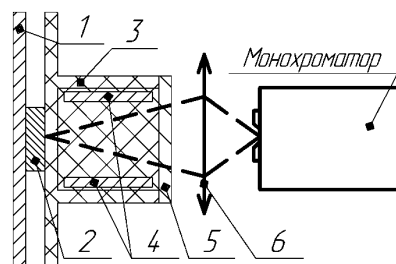
Для исследования ЭЛ, электрофизических параметров и фотопроводимости диэлектрических слоев, сформированных на кремниевых подложках, необходимо создавать диодные структуры, обеспечивающие максимальный квантовый выход. Наиболее простым и распространенным методом создания тестовых структур является формирование прозрачных проводящих контактов на поверхности диэлектрических слоев. Электрофизические и светоизлучающие свойства создаваемых тестовых структур во многом определяются их топологией, материалом и типоразмерами контактов. Наиболее распространенными материалами для формирования прозрачных и полупрозрачных электродов являются легированный поликристаллический кремний, оксид индия-олова, тонкие пленки металлов (Al, Au), жидкий электролит (водный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ) [1]. Применение электролита в качестве прозрачного контакта к диэлектрическому слою имеет ряд особенностей, позволяющих значительно расширить возможности метода ЭЛ, повысить его точность и информативность. Среди основных преимуществ системы электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) при исследовании ЭЛ структур  $\text{SiN}_x/\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_x/\text{Si}$  и  $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{Si}$  можно выделить следующие:

- Возможность создания в диэлектрическом слое более сильных электрических полей по сравнению с системой МДП;
- Возможность измерения спектрального распределения ЭЛ при послойном стравливании диэлектрического слоя, что позволяет получить распределение излучающих центров по глубине диэлектрического слоя;
- Высокая спектральная прозрачность электролита;
- Простота нанесения и удаления полевого электрода.

Для реализации метода ЭЛ в системе ЭДП на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета создана установка, позволяющая регистрировать спектры электролюминесценции в диапазоне 250–1000 нм.

В состав установки входит: электрохимическая ячейка, источник питания Б5-50, стабилизаторы тока и напряжения, многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) В-380, монохроматор МДР-23, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100, охлаждаемая кремниевая ПЗС линейка, регистрирующая система «Spectralink» с компьютером.

На рисунке 1 представлена оптическая схема разработанной экспериментальной установки.



1 – анод, 2 – образец, 3 – электрохимическая ячейка, 4 – катоды, 5 – кварцевое стекло, 6 – кварцевая линза  
Рисунок 1 – Оптическая схема экспериментальной установки для регистрации спектров электролюминесценции в системе ЭДП, вид сверху

Электрохимическая ячейка представляет собой ёмкость, изготовленную из PLA пластика методом трехмерной печати. Внутренний объем ячейки – 4 см<sup>3</sup>. Катоды изготовлены из химически инертного сплава. Исследуемый образец помещается между анодом и отверстием в электрохимической ячейке, которое обеспечивает электрический контакт образца с электролитом и служит для вывода излучения.

На рисунке 2 представлена структурная электрическая схема установки для возбуждения ЭЛ в системе ЭДП.

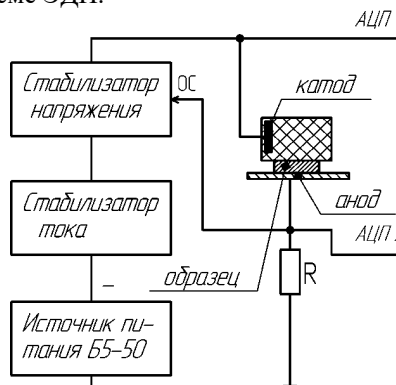


Рисунок 2 – Структурная электрическая схема установки для возбуждения электролюминесценции в системе ЭДП

В представленной установке реализована возможность проведения измерений при постоянном токе в диапазоне 1 мкА..20 мА с шагом 1 мкА или постоянном напряжении в диапазоне 1..300 В с шагом 0,5 В на исследуемом образце. Входящий в состав установки многоканальный АЦП позволяет осуществлять контроль напряжения и тока, а так же записывать временные зависимости тока, напряжения и заряда протекающего через образец в процессе регистрации спектра. Сопоставление полученных временных зависимостей напряжения и тока со спектрами ЭЛ позволяет определить влияние степени заполнения электронных и дырочных ловушек на спектральный состав и интенсивность полос ЭЛ, определить наиболее эффективный режим воз-

буждения ЭЛ, оценить величину напряжения пробоя исследуемого образца.

Установка была апробирована на структурах Si/SiO<sub>2</sub>, Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Si/SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>. На рисунке 3 представлены спектры ЭЛ образцов Si/SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>0,9</sub>/SiO<sub>2</sub>, зарегистрированные при различных плотностях протекающего тока. Диэлектрические слои оксида и нитрида кремния сформированы методом химического осаждения из газовой фазы на кремниевой пластине p-типа. Общая толщина диэлектрических слоев составляет 140 нм. Спектры ЭЛ зарегистрированы при анодной поляризации кремниевой подложки.

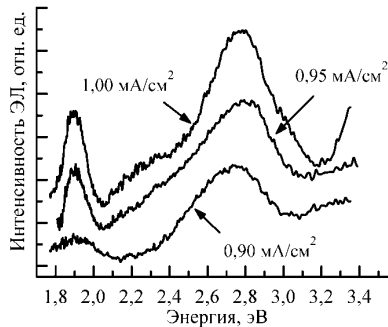


Рисунок 3 – Спектры электролюминесценции образца p-Si/SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>0,9</sub>/SiO<sub>2</sub>

Спектры ЭЛ характеризуется полосами с энергиями в красной (1,9 эВ), зеленой (2,3 эВ) и синей (2,7 эВ) области, причем последняя полоса имеет наибольшую интенсивность. Полоса

в красной области спектра ЭЛ связана с наличием в слоях SiO<sub>2</sub> силанольных групп (Si-OH). ЭЛ в зеленой области объясняется внутрицентровыми переходами в атомах трехкоординированного кремния в слоях SiO<sub>2</sub>. Интенсивная полоса ЭЛ с максимумом при 2,7 эВ характерна для излучательной релаксации силиленовых центров [2]. Наличие этих центров присуще слоям оксинитрида кремния, что позволило сделать заключение о формировании таких слоев на границах оксида и нитрида кремния. Установлено, что интенсивность свечения этой полосы обладает наибольшей устойчивостью к воздействию сильных электрических полей после протекания через образец заряда 1-3 Кл/см<sup>2</sup>.

Таким образом, реализованный метод электролюминесценции позволяет изучить состав, структурные особенности, определить концентрацию центров люминесценции, исследовать деградацию диэлектрических слоев в результате воздействия сильного электрического поля.

#### Литература

1. Барабан, А.П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии / А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. – Л.: Изд. ЛГУ, 1988. – 304 с.
2. Baraban, A.P. Electroluminescence of Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> structures / A.P. Baraban [et al.] // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28, № 12. – P. 978–980.

UDC 621

#### ANISOTROPY OF THERMO-OPTICAL COEFFICIENTS OF ALEXANDRITE LASER CRYSTAL

P. Loiko<sup>1</sup>, S. Ghanbari<sup>2</sup>, V. Matrosov<sup>3</sup>, K. Yumashev<sup>4</sup>, A. Major<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada

<sup>3</sup> Solix Ltd., Minsk, Belarus

<sup>4</sup> Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Alexandrite (Cr<sup>3+</sup>:BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) is a well-known crystal for tunable lasers relying on vibronic coupling [1–3]. Alexandrite provides intense emission between 0.7 and 0.85 μm with a maximum at around 0.75 μm [4, 5]. The corresponding stimulated-emission cross-section is relatively small,  $\sigma_{SE} = 0.7 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>, which is compensated by a relatively long lifetime of the upper laser level  $\tau \sim 260$  μs at room temperature. Thus, the  $(\sigma_{SE}\tau)$  product is large and the efficient and low-threshold continuous-wave laser operation of alexandrite is possible [6]. The Cr<sup>3+</sup> ions in orthorhombic BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> exhibit strong polarization-anisotropy of the spectroscopic properties (the high-gain light polarization is  $E \parallel b$ ) [4, 5] and linearly polarized laser output is easily achievable.

The Alexandrite lasers have relevant applications in medicine (dermatology), space LIDAR technologies, spectroscopy [7] and can replace Ti:Sapphire lasers in nonlinear microscopy.

Alexandrite exhibits a combination of attractive thermal and mechanical properties, namely very high thermal conductivity  $\kappa \sim 23$  W/(mK), weak and almost isotropic thermal expansion  $\alpha \sim 7 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>, and high optical damage threshold [3, 8]. However, thermo-optical properties of alexandrite have not been studied in detail to date.

In the present report, we aimed to measure the thermo-optic coefficients (TOCs,  $dn/dT$ ) and to characterize thermal variation of the optical path length of alexandrite with respect to light polarization.

Alexandrite is orthorhombic (sp. gr. *Pnma*) and thus optically biaxial [9]. Its optical properties are characterized in the frame of the optical indicatrix. The optical indicatrix axes are mutually orthogonal and they coincide with the crystallographic axes **a**, **b**, **c**. The corresponding principal refractive indices are  $n_a$ ,  $n_b$  and  $n_c$  (for polarizations  $E \parallel a$ ,  $E \parallel b$  and  $E \parallel c$ , respectively) with  $n_c < n_a < n_b$ . Similarly to the

refractive indices, three principal TOCs exist for alexandrite, namely  $dn_a/dT$ ,  $dn_b/dT$  and  $dn_c/dT$ . No predefined relation for the corresponding TOCs is expected.

For the measurements of TOCs of alexandrite, the laser beam deviation method for a material with a linear thermal gradient was used [10]. The measurements were done using a 0.06 at.%  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$  crystal (Solix Ltd.) which was cut to a rectangular sample with dimensions of  $5.58(\mathbf{a}) \times 6.22(\mathbf{b}) \times 6.87(\mathbf{c})$  mm<sup>3</sup>. All six surfaces were polished to a laser grade quality. A set of probe lasers emitting in the spectral range of 0.4-1.1  $\mu\text{m}$  was used. The probe radiation was linearly polarized. The measurements were done at 298 K. The linear temperature gradient in the sample was  $\sim 1$ -2 K/mm. It was determined separately for each sample orientation. The actual temperature of the hot and cold surfaces of the crystal was measured using sensitive thermocouples with a precision of 0.1 K.

The laser beam deviation method allows one to measure the so-called thermal coefficients of the optical path (TCOP),  $dn/dT + (n-1)\alpha$ . The precision of the TCOP measurements was 7-10% depending on the crystal cut. The  $n$  and  $dn/dT$  are determined by light polarization  $\mathbf{E}$  and  $\alpha$  (the linear thermal expansion coefficient) is determined by light propagation direction  $\mathbf{k}$ . For orthorhombic Alexandrite, there are three principal  $\alpha$  values along the  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  and  $\mathbf{c}$  directions ( $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$  and  $\alpha_c$ , respectively). For any biaxial crystal incl. alexandrite, a total of 6 independent TCOPs can be measured leading to 3 principal TOCs each of which is determined from two measurements [10].

At first, we measured the six principal thermal coefficients of the optical path (TCOPs). Their dispersion is illustrated in Fig. 1 (a-c). All TCOPs are positive in the whole studied spectral range. The TCOP values show a polarization-anisotropy which is especially clear for the  $\mathbf{a}$ -cut and  $\mathbf{b}$ -cut crystals. In order to calculate the TOCs, i.e.,  $dn/dT = \text{TCOP} - (n-1)\alpha$ , we used the literature data on the refractive index (calculated from the Sellmeier equations reported in [16]) and on the linear thermal expansion coefficients ( $\alpha_a = 5.9$ ,  $\alpha_b = 6.1$ ,  $\alpha_c = 6.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [3, 7]). The results are shown in Fig. 1 (d). All three principal TOCs for alexandrite are positive and show a notable anisotropy. For the whole studied spectral range,  $dn_c/dT > dn_b/dT > dn_a/dT$ . The TOCs determined from the measurements for different crystal cut were in good agreement with each other, as indicated by the error bars in Fig. 1 (d).

To calculate the TCOPs and  $dn/dT$  at the particular laser wavelength, the dispersion of the  $dn/dT$  was modeled taking into account (i) volumetric thermal expansion (expressed by the  $\alpha_{\text{vol}} = \alpha_a + \alpha_b + \alpha_c$  coefficient) and (ii) temperature dependence of the electronic bandgap  $E_g$  (expressed by a temperature derivative,  $dE_g/dT$ ) [10]:

$$dn_i/dT = -\alpha_{\text{vol}} \frac{(n_{\infty}-1)}{2n_i(\lambda)} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{\text{lg}}^2} - \frac{1}{E_g} \frac{dE_g}{dT} \frac{(n_{\infty}-1)}{2n_i(\lambda)} \left( \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{\text{lg}}^2} \right)^2. \quad (1)$$

In the Eq. (1),  $i = a, b, c$ ,  $\lambda$  is the light wavelength;  $\lambda_{\text{lg}} [\mu\text{m}] = 1.2398/E_g [\text{eV}]$ ,  $n(\lambda)$  is the Sellmeier equation,  $n_{\infty}$  is the refractive index in the long-wavelength infrared limit, see Ref [9]. The  $dn/dT$  value can be represented as a sum of two terms related to (i) and (ii) effects,  $(dn/dT)_a + (dn/dT)_g$ , which have negative and positive values, respectively. The experimental data in Fig. 1 (d) were modeled with Eq. (1) with  $E_g$  and  $dE_g/dT$  as free parameters leading to the thermo-optic dispersion curves. The best-fit parameters, depending on the light polarization, are in the range of 5.7-6.3 eV and  $-1.4 - 2.7 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ , respectively. For alexandrite, the density functional theory predicts a direct bandgap of 6.45 eV [11] while the UV absorption edge is located at about 9 eV [3]. According to the Eq. (1), the positive  $dn/dT$  coefficients of alexandrite are related to the weak thermal expansion, so that the contribution of the  $(dn/dT)_g$  term is dominant.

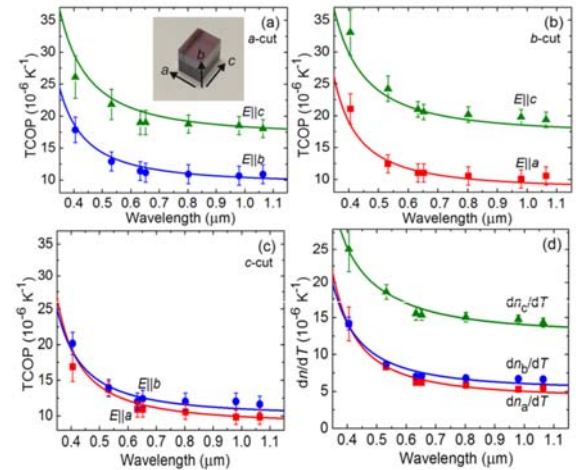


Fig. 1. Thermo-optical properties of alexandrite: (a-c) dispersion of TCOP for the  $\mathbf{a}$ -cut (a),  $\mathbf{b}$ -cut (b) and  $\mathbf{c}$ -cut (c) crystals: *symbols* – experimental data, *curves* – data calculated using the thermo-optic dispersion formulas, Eq. (2), *error bars* indicate the uncertainty arising from the laser beam deviation method; (d) dispersion of TOCs: *symbols* – experimental data, *curves* – their fitting with Eq. (1), *error bars* indicate the uncertainty arising from the averaging of the  $dn/dT$  values for two different crystal cuts. *Inset* in (a) – photo of the studied crystal

The thermo-optic dispersion formulas can be also represented in a simplified form [10]:

$$dn/dT = A_0 + \frac{A_1}{\lambda^2} + \frac{A_2}{\lambda^4} + \frac{A_3}{\lambda^6}, \quad 10^{-6} \text{ K}^{-1}. \quad (2)$$

Here,  $\lambda$  is in  $\mu\text{m}$ ;  $A_{0-3}$  are the expansion coefficients ( $A_0$  corresponds to the  $dn/dT$  value in the long-wavelength limit,  $A_{1-3}$  represent its dispersion), see Table 1.

Using the derived thermo-optic dispersion formulas, we calculated TOCs at 0.75  $\mu\text{m}$  as  $dn_a/dT = 5.9$ ,  $dn_b/dT = 6.9$  and  $dn_c/dT = 15.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . The anisotropy of the  $dn/dT$  values is much stronger than that of the refractive indices,  $n_a = 1.737$ ,  $n_b = 1.742$ ,  $n_c = 1.735$  at 0.75  $\mu\text{m}$  [9]. The values of the  $dn_a/dT$  and  $dn_b/dT$  are lower than 9.4 and  $8.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , respectively, previously measured at 1150 nm [2]. There is no previous data on the  $dn^c/dT$ . Furthermore, we calculated the dispersion curves for the TCOP values,  $\text{TCOP}(\lambda) = dn/dT(\lambda) + [n(\lambda) - 1]\alpha$ , see Fig. 1 (a-c). The six principal TCOPs at 0.75  $\mu\text{m}$  are listed in Table 2. In particular, for a *c*-cut crystal and light polarization  $E \parallel b$ ,  $\text{TCOP} = 11.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Table 1. Coefficients in the Thermo-Optic Dispersion Formulas for Alexandrite Crystal, Eq. (2)

| TOC       | $A_0$ | $A_1, \mu\text{m}^2$ | $A_2, \mu\text{m}^4$ | $A_3, \mu\text{m}^6$ |
|-----------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $dn_a/dT$ | 3.95  | 1.1842               | 0.0786               | 0.0246               |
| $dn_b/dT$ | 5.12  | 0.9848               | 0.0129               | 0.0141               |
| $dn_c/dT$ | 12.72 | 1.3275               | 0.0320               | 0.0121               |

Table 2. Thermal coefficients of the optical path ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) of alexandrite crystal at 0.75  $\mu\text{m}$

| Crystal cut   | Polarization    |                 |                 |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|               | $E \parallel a$ | $E \parallel b$ | $E \parallel c$ |
| <i>a</i> -cut | –               | +11.2           | +19.5           |
| <i>b</i> -cut | +10.4           | –               | +19.7           |
| <i>c</i> -cut | +10.8           | +11.9           | –               |

To conclude, we have studied dispersion and anisotropy of the  $dn/dT$  coefficients and TCOPs of alexandrite laser crystal. All three principal  $dn/dT$  are positive (due to the dominant effect of temperature variation of the bandgap over the weak thermal expansion) and they exhibit a notable polarization-anisotropy,  $dn_c/dT > dn_b/dT > dn_a/dT$ . For the high-gain laser polarization ( $E \parallel b$ ),  $dn/dT$  has an intermediate value of  $6.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  at 0.75  $\mu\text{m}$ . Positive  $dn/dT$  underlies positive (focusing) thermal lens of alexandrite lasers. We believe that a detailed knowledge of the thermo-optical properties of alexandrite crystal will help in designing laser cavities of high-power oscillators based on this laser crystal.

УДК 535-7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ МУТНЫХ СРЕД МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

Маляренко Д.Ю., Безуглая Н.В.

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

В основе методов исследования показателя преломления биологических сред лежат три основных физических явления: рефракция, интерференция и полное внутреннее отражение (ПВО). Измерительные средства могут быть реализованы как на одном явлении, так и нескольких [1]. Наиболее распространенными можно считать методы технической реализации, бази-

## References

1. J.C. Walling, O.G. Peterson, H.P. Janssen, R.C. Morris, and E.W. O'Dell, «Tunable Alexandrite lasers», IEEE J. Quantum Electron. 16(12), 1302–1315 (1980).
2. J. Walling, F.H. Donald, H. Samelson, D.J. Harter, J. Pete, and R. C. Morris, «Tunable Alexandrite lasers: development and performance», IEEE J. Quantum Electron. 21(10), 1568–1581 (1985).
3. C.F. Cline, R.C. Morris, M. Dutoit, and P.J. Harget, «Physical properties of BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> single crystals», J. Mater. Sci. 14(4), 941–944 (1979).
4. R.C. Powell, L. Xi, X. Gang, G.J. Quarles, and J.C. Walling, «Spectroscopic properties of alexandrite crystals», Phys. Rev. B Condens. Matter 32(5), 2788–2797 (1985).
5. E.V. Pestryakov, A.I. Alimpiev, and V.N. Matrosov, «Prospects for the development of femtosecond laser systems based on beryllium aluminate crystals doped with chromium and titanium ions», Quantum Electron. 31(8), 689–696 (2001).
6. S. Ghanbari and A. Major, «High power continuous-wave Alexandrite laser with green pump», Laser Phys. 26(7), 075001 (2016).
7. H. Samelson, J.C. Walling, and D.F. Heller, «Unique applications of alexandrite lasers», Proc. SPIE 0335, 85–94 (1983).
8. D.A. Vinnik, P.A. Popov, S.A. Archugov, and G.G. Mikhailov, «Heat conductivity of chromium-doped alexandrite single crystals», Dokl. Phys. 54(10), 449–450 (2009).
9. P. Loiko and A. Major, «Dispersive properties of alexandrite and beryllium hexaaluminate crystals», Opt. Mater. Express 6(7), 2177–2183 (2016).
10. P.A. Loiko, K.V. Yumashev, N.V. Kuleshov, G.E. Rachkovskaya and A.A. Pavlyuk «Thermo-optic dispersion formulas for monoclinic double tungstates KRe(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> where Re = Gd, Y, Lu, Yb», Opt. Mater. 33(11), 1688–1694 (2011).
11. W.Y. Ching, Y.-N. Xu, and B.K. Briceken, «Comparative study of the electronic structure of two laser crystals: BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and LiYF<sub>4</sub>», Phys. Rev. B 63(11), 115101 (2001).

рующиеся на измерении критического угла (полного внутреннего отражения) в отраженном от объекта свете [2–6]. В общем случае они дают высокую точность, но, анализируя применение этих методов относительно мутных биологических сред и полученные с их помощью результаты, можно сделать вывод, что значения показателя преломления для одинаковых биологиче-

ских сред (БС) отличаются [1]. Это можно объяснить тем, что излучение, проходящее сквозь мутную среду, испытывает рассеяние, которое не учитывают известные методы [3–6]. Полученный разброс значений является нежелательным, ведь каждая БС должна иметь устойчивый набор оптических параметров, которые не зависят от метода исследований.

Для увеличения точности измерений показателя преломления мутных биологических сред в данной работе предложено использование эллипсоидального рефлектора, применение которого имеет ряд преимуществ в оптике биологических сред [7, 8].

Реализация предложенных измерений может быть осуществлена с помощью использования существующих эллипсоидов, изготовленных методом траекторного копирования [9] или 3d печати с внутренним зеркальным напылением [10]. В этом случае нужно использовать дополнительные оптические элементы (например, призма AP-90°) для доставки оптического излучения, а также для создания условий возникновения полного внутреннего отражения. При использовании стеклянного эллипсоида с внутренним зеркальным покрытием сам оптический элемент отвечает за возникновение ПВО.

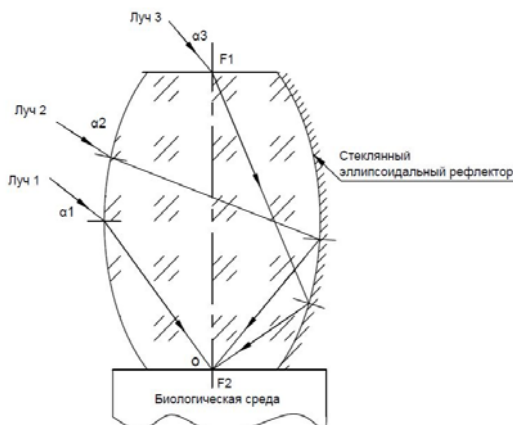


Рисунок 1 – Варианты падения излучения на стеклянный эллипсоидальный рефлектор при исследовании показателя преломления

Для корректной работы предложенного метода существует необходимость, чтобы излучение, проходящее через стеклянный эллипсоидальный рефлектор, было сфокусировано в центральной точке его нижней фокальной плоскости. Учитывая это, путем построения по координатной схеме метода, было определено три возможных варианта падения излучения и распространения его в оптическом элементе (рис. 1):

- падение излучения на боковую грань эллипсоида без дополнительного взаимодействия (луч 1, рис. 1);
- падение излучения на боковую грань эллипсоида с последующим отражением от противоположной грани (луч 2, рис. 1);

- падение излучения на верхнюю фокальную плоскость эллипсоида с последующим отражением от боковых граней (луч 3, рис. 1).

Целью данной работы было определение критического угла для этих трех вариантов падения излучения и разных эксцентриситетов эллипсоида при условии, что после прохождения через объем стеклянного эллипсоидального рефлектора, луч попадет в центр нижней фокальной плоскости. А также, на основании проведенных расчетов, подобрать наиболее оптимальные параметры для изготовления стеклянного эллипсоидального рефлектора.

Входными данными для проведения расчетов были: показатель преломления биологической среды  $n_{БС} = 1.5$ , показатель преломления стеклянного эллипсоида  $n_c = 1.8$ , фокальный параметр стеклянного эллипсоида  $p = 18$  мм, а также диапазон значений эксцентриситета  $e$  от 0,1 до 1 с шагом 0,05. Для обеспечения попадания луча в центр фокальной плоскости (точка  $O$ , рис. 1), расчеты производились в обратном ходе лучей. Результаты расчетов для заданных параметров и при разных вариантах падения луча приведены на рис. 2.

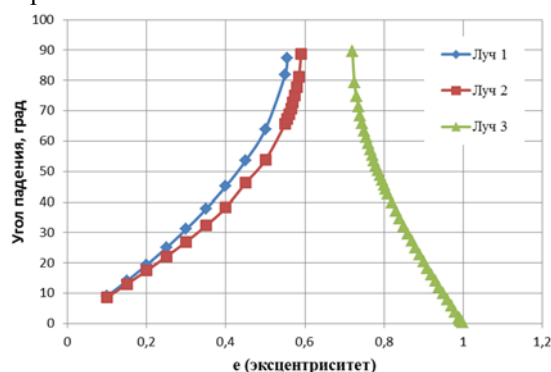


Рисунок 2 – Зависимость угла падения от эксцентриситета эллипсоидального рефлектора для рассмотренных случаев падения

Анализ графика на рис. 2 показывает, что существует определенный диапазон эксцентриситетов (0,63–0,72) эллипсоидального стеклянного рефлектора, применение которого не позволяет реализовывать предложенный метод. Наиболее универсальными оказался диапазон эксцентриситетов от 0,1 до 0,555, при котором возможно достижение критического угла на границе «эллипсоид – БС» при падении излучения на боковую грань эллипсоида как с отражением от противоположной грани, так и без него. Также, полученные результаты свидетельствуют о возможности применения падения излучения на верхнюю фокальную плоскость с использованием диапазона эксцентриситетов эллипсоида от 0,8 до 0,95.

Однако, по координатное моделирование распространения излучения внутри стеклянного эллипсоида при падении на боковую грань с от-

ражением на противоположной стороне показало возникновение многократного внутреннего отражения, что свидетельствует о нецелесообразности применения такого излучения. Также, из конструктивных соображений, реализация метода с применением излучения, которое падает на верхнюю фокальную плоскость эллипсоида, будет довольно сложной. Поэтому, наиболее оптимальным вариантом технической реализации метода определения показателя преломления биологических сред есть использование стеклянного эллипсоидального рефлектора с эксцентриситетом в диапазоне от 0,3 до 0,55 [9–10] и при падении излучения на боковую грань без отражения от противоположной.

### Литература

1. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / Перевод с англ. под ред. В.В. Тучина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 812 с.
2. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: В 2 т. / В.В. Тучин – М. : Физматлит., 2008. – Том 1 – 560 с.
3. Bolin F.P. Refractive index of some mammalian tissues using a fiber optic cladding method / F.P. Bolin, L.E. Preuss, R.C. Taylor, R.J. Ference // Appl. Opt. – 1989. – Vol. 28. – P. 2297-2303.
4. Li H. Measurement method of the refractive index of biotissue by total internal reflection / H. Li, S. Xie // Appl. Opt. – 1996. – Vol. 35. – P. 1793–1795.
5. Cheng S. Measurement of the refractive index of biotissue at four laser wavelengths / S. Cheng, H.Y. Shen, G. Zhang, C.H. Huang, X.J. Huang // Proc. SPIE 4916 – 2002. – 172–177.
6. Tsenova V. Refractive index measurement in human tissue samples / V. Tsenova, E. Stoykova // Proc. SPIE 5226 – 2003. – 413–417.
7. Безугла Н.В. Просторова потокова біометрія середовищ еліпсоїдальними рефлекторами / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Ю.В. Чмир // Електроніка і зв'язок. – 2014. – Том 19. – № 6 (83). – С. 87–93.
8. Bezuglyi M.A. Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors / M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk // Devices and Methods of Measurements. – 2018. – Vol. 9(1) – P. 56–65.
9. Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Синявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування, 2016. – № 2 (52). – С. 76–81.
10. Безуглий М.О. Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів / М.О. Безуглий, Ліночева О.В., Безугла Н.В., Бик М.В., Костюк С.А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування, 2017. – № 1 (53). – С. 62–69.

УДК 615.831.7

## СРАВНЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН НА РАЗНЫЕ ТИПЫ КОЖИ

Шмендель О. Г., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

**Постановка проблемы.** Использование лазеров является одним из перспективных направлений развития терапии и хирургии. Влияние низкоинтенсивных лазеров (НИЛ) стимулирует восстановительные процессы в тканях, что позволяет ускорять регенерацию благодаря более быстрой микроциркуляции обменных процессов.

Именно поэтому в данной работе было исследовано влияние лазерного излучения (ЛИ) с длинами волн 0,63 мкм и 0,46 мкм на температурные процессы в верхних слоях кожи.

**Математическая модель.** Для объективной оценки результатов эксперимента мы разработали математическую модель взаимодействия параметров лазерного луча и параметров эпидермиса [2, 4].

$$D_{\text{полг}} = D_{\text{пад}} \cdot k \cdot t = k_M \cdot C \cdot k_C \cdot \xi \cdot \frac{P_{\text{пад}}}{S} \cdot [1 - \rho(\lambda)] \cdot t \quad (1)$$

где  $D_{\text{пад}}$  – доза падающего лазерного излучения;  $k$  – обобщенный параметр, что учитывает изме-

нения параметров биологической ткани и окружающей среды;  $P_{\text{пад}}$  – падающая средняя мощность лазерного излучения, что задается при воздействии;  $S$  – площадь исследуемого объекта;  $t$  – экспозиция (время воздействия);

Рассмотрим составляющие обобщенного параметра  $k$ :

$$k = k_M \cdot C \cdot k_C \cdot \xi \cdot [1 - \rho(\lambda)], \quad (2)$$

где  $k_M$  – коэффициент количества меланина в коже,  $C$  – корректирующий температурный коэффициент,  $k_C$  – коэффициент интенсивности секреции сальных желез,  $\xi$  – коэффициент теплового поглощения эпидермиса,  $\rho(\lambda)$  – коэффициент отражения эпидермиса.

**Эксперимент.** Эксперимент был поделен на два этапа:

1. Лазерный физиотерапевтический аппарат АФЛ-2 – непрерывный режим излучения (длина волны – 630 нм, плотность мощности 0,1 мВт/мм<sup>2</sup>) [2, 4];

2. Аппарат МИТ-МТ с излучателем для гинекологии (длина волны – 460 нм, плотность мощности 0,1 мВт/мм<sup>2</sup>) [4].

С помощью инфракрасной камеры «MobiRM3» измерялась температура кожи подопытных.

Температура облучаемого объекта измерялась до начала облучения и каждую следующую минуту на протяжении периода проведения эксперимента, который длился 6 минут.

Взаимодействие лазерным излучением в двух этапах происходило на участок кожи правой и левой рук над пястью указательного пальца (рис. 1). Расстояние от источника лазерного излучения до биологического объекта – 1,5 см.

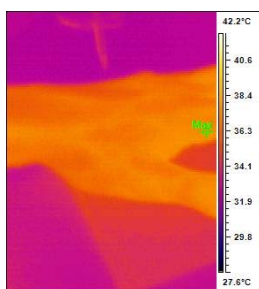


Рисунок 1 – Облучаемый участок объекта: (левая рука)

На первом этапе эксперимента были измеренные изменения температуры у 10 подопытных с III типом кожи и у 1 подопытного с VI типом кожи. Тип кожи был определен на основании классификации Томаса Фицпатрика (состоит из 6 типов). Возраст подопытных – от 20 до 23 лет. Нормальное состояние здоровья. Телосложение – худощавое. Вес: от 50 до 70 кг.



Рисунок 2 – Фото эксперимента (III тип кожи)



Рисунок 3 – Фото эксперимента (VI тип кожи)

На втором этапе эксперимента было изменено изменение температуры у 10 подопытных

с III типом кожи. Возраст подопытных – от 20 до 23 лет. Нормальное состояние здоровья. Телосложение – худощавое. Вес: от 50 до 70 кг. А также было проведено эксперимент с VI типом кожи и проведено сравнение по результатам эксперимента с III типом кожи.

Исследования проводились при разной температуре внешней среды (Тв.с.), температура в лаборатории колебалась от 20°C до 22°C.

**Результаты.** На графике этапа 1 (Рис. 4) есть сравнение изменения температуры под воздействием ЛИ с длиной волны 0,63 мкм.

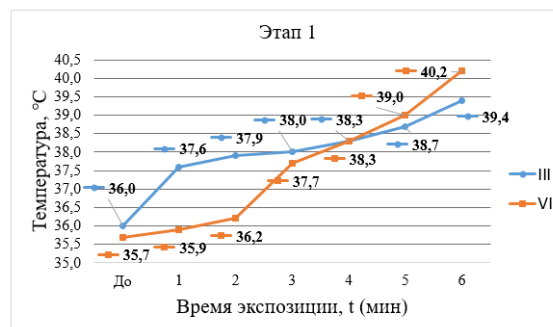


Рисунок 4 – График сравнения результатов первого этапа эксперимента

На графике этапа 2 (Рис. 5) показано сравнение изменения температуры под воздействием ЛИ с длиной волны 0,46 мкм.

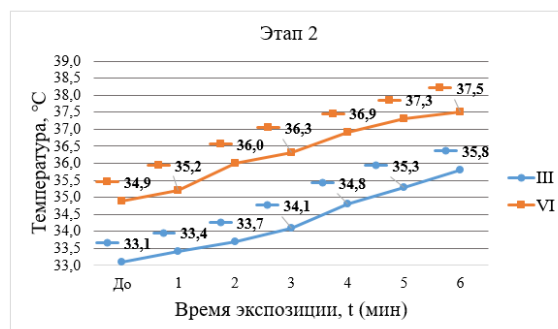


Рисунок 5 – График сравнения результатов второго этапа эксперимента

**Выводы.** При воздействии излучения на кожу возникают аппаратные погрешности (1-5) % в измерениях в связи с недостаточной точностью регистрации температуры тепловизором. Также нужно учитывать множество факторов таких как изменения температуры окружающей среды (5-7) %, а также особенности физиологии каждого человека, которые имеют непосредственное влияние на получаемые результаты. Проанализировав полученные данные можно сделать выводы, что термические свойства отличаются в разных типах кожи и кожа, соответственно, реагирует на воздействие ЛИ с некоторыми различиями, а точнее более темная кожа нагревается быстрее, светлая медленнее. Но в связи с малым количе-



ством меланина, что уменьшат защиту, в коже типов I-III нужно особо тщательно подходить к выбору мощности, длины волны и времени облучения, чтобы не нанести повреждения облучаемому объекту.

Подбор лазерного терапевтического аппарата и параметров лазерного излучения должен зависеть от места воздействия, характера влияния и эффективности результата терапии.

### Литература

1. Тымчик Г.С. Мониторинг изменений температур при лазерной терапии / Г.С. Тымчик, Н.Ф. Терещенко, М.Р. Печена // Вестник НТУУ «КПИ». Серия приборостроения, 2014. – Вып. 47. – С. 156–162.

2. Тымчик Г.С. Исследования влияния лазерного излучения на температурные процессы в биологических тканях / Г.С. Тымчик, Н.Ф. Терещенко, О.Г. Ляшенко, О.С. Гнатейко // Вест-

ник НТУУ «КПИ». Серия приборостроения, 2015. – Вып. 49. – С. 153–158.

3. Шмендель О.Г. Математическая модель температурных изменений в биологических тканях при лазерном облучении с учетом типа кожи / О.Г. Шмендель, Н.Ф. Терещенко // XVI Международная научно-техническая конференция «Физические процессы и поля технических и биологических объектов». Кременчуг, 2017. – С. 90–92.

4. Шмендель О.Г. Влияние лазерного излучения разных длин волн на температурные процессы в биологических тканях / О.Г. Шмендель, Н.Ф. Терещенко // Лазерная хирургия. Материалы научно-практической конференции «Лазерные технологии в клинической медицине: современные тенденции развития в Украине» / укл. В.В. Холин, А.В. Корунець. – Черкассы : Вертикаль. Издатель С.Г. Кандич, 2018. – 298 с.ил. – С. 253–260, с. 253–260.

УДК 681.7.012:681.785.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОГО РЕФЛЕКТОРА НА ОСВЕЩЕННОСТЬ В ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Гелич И.В.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Диагностические средства в биофотонике, как и любые оптико-электронные приборы, могут содержать в своем составе огромную номенклатуру по конфигурации и размерам оптических элементов и систем. Причем несколько качественно изготовлены и проконтролированы оптические элементы, настолько и точной будет биомедицинская диагностика. Развитие стеклообрабатывающих технологий и рост требований к таким измерительным средствам привело к широкому внедрению оптических деталей с несферическим (асферичным) профилем поверхности. Не смотря на значительно меньше габариты оптической системы, они позволяют получить высокие передающие и аберрационные характеристики.

Фотометрия мутных сред, в том числе и биологических, имеет ряд функциональных особенностей, которые накладывают отпечаток на критерии качества при оценке оптических систем. Так, например, самым распространенным методом в оптике биотканей является метод интегрирующих сред, основными требованиями к которым являются сферичность внутренней поверхности и качество диффузного покрытия, обеспечивающие равномерное рассеивание внутри сферы. Контроль формы и покрытия в этом случае достаточно хорошо отработаны. Но вместе с тем, интегральность регистрируемых потоков существенно ограничивает возможности фотометрии интегрирующими сферами. Большим

функционалом обладает фотометрия эллипсоидальными рефлекторами [1, 2], для которой уже также хорошо разработаны методы изготовления и контроля формы внутренней отражающей поверхности [3, 4]. Как известно, оптические элементы с несферическим профилем поверхности менее склонны к различным видам аберраций, что делает использование их типовых конфигураций в качестве хорошего решения в оптике светорассеивающих сред.

Фотометры с эллипсоидальными рефлекторами (ЭР) представлены как измерительные средства при исследовании оптических свойств биологических тканей. Основной конструктивной особенностью таких фотометров является его техническое исполнение, основанное на использовании рефлектора с внутренней отражающей поверхностью в виде усеченного по фокальным плоскостям эллипсоида вращения. Спектральный диапазон работы фотометров с ЭР зависит от параметров лазерного источника и отражающих свойств внутренней зеркальной поверхности эллипсоида вращения.

Используя фотометры с ЭР, преимущественно имеют дело с регистрацией полного пропускания, диффузного пропускания и отражения, а также коллимированного пропускания. Некоторые типы фотометров имеют конструкцию, обеспечивающую возможность регистрации, кроме указанных, еще и коллимированного от-

ражения, что подтверждает тот факт, что данный класс фотометров позволяет получить более чем необходимую информацию для исследования оптических свойств биологической среды.

Эллипсоидальный рефлектор является не-сферической поверхностью второго порядка потому для описания его поверхности используют те же уравнения, используемые для описания асферических поверхностей высшего порядка. В таких программах для автоматизированного расчета оптических систем, как CAPO и OPAL [5], одним из способов задания асферических поверхностей высшего порядка являются коэффициенты уравнения в системе координат, связанной с вершиной поверхности

$$u = a_1z - a_2z^2 + a_3z^3 + \dots \quad (1)$$

где  $u = x_2^2 + y_2^2$ , коэффициент  $a_1$ , связанный с радиусом кривизны  $r_0$ , при вершине поверхности  $a_1 = 2/r_0$ , а коэффициент  $a_2$  – с эксцентриситетом  $e$  который образован кривой второго порядка  $a_2 = (1 - e^2)$ .

В других программах, например, в ZEMAX, CODE-V, OSLO [5], используется уравнение вида:

$$z = \frac{u \times p_0}{1 + \sqrt{1 - u \times p_0^2 \times (1 - e^2)}} + b_1u^2 + b_2u^4 + b_3u^6 + \dots \quad (2)$$

где  $p_0 = 1/r_0$  – кривизна поверхности при вершине.

Удобство использования уравнения (1) состоит, прежде всего, в том, что каждый коэффициент уравнения определяет только соответствующий порядок аберрации, позволяет наглядно использовать эти коэффициенты для баланса аберраций при проектировании оптических систем. Однако, не все программы позволяют непосредственно задавать асферические уравнения такого вида. Кроме того, иногда возникает необходимость проверки расчетов, выполненных с использованием уравнения (1), с помощью другого программного обеспечения. Переход от уравнения типа (1) к типу (2) однозначный только для случая уравнения второго порядка, поэтому при использовании поверхностей высшего порядка при переходе от одной программы для автоматизированного расчета оптических систем в другую необходимо выполнять перерасчет коэффициентов уравнения асферической поверхности. Но не одно из уравнений не позволяет описать асферичную поверхность эллипсоида достаточно точно, поэтому был разработан метод трассирования лучей [6].

В данной работе приведено исследования освещения зон фотометрического изображения, которое получено при трассировке лучей в системе «биологическая ткань + ЭР», для разных эксцентриситетов при фиксированном фокальном параметре 11 мм. Фотометрические изображения были получены путем запуска 20 миллионов фотонов бесконечно тонкого пучка в ткань

печени свиньи со следующими оптическими свойствами:  $\mu_a = 0,66$ ;  $\mu_s = 1,22$ ;  $n = 1,39$ ;  $g = 0,76$ ; толщина слоя составляла 1 мм.

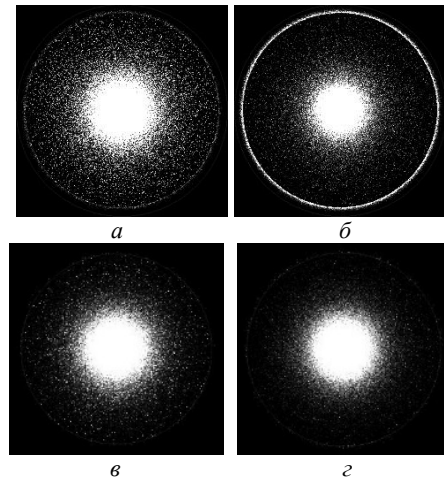


Рисунок 1 – Фотометрические изображения образца печени свиньи для ЭР с эксцентриситетами 0,4 (а, б) и 0,8 (в, з) в прошедшем (а, в) и отраженном (б, з) свете

На основании анализа серии таких фотометрических изображений (рис.1) были получены графики зависимости освещенности различных зон. На рис. 2 приведен график зависимости освещенности внешнего кольца изображения от эксцентриситета ЭР, граничные значения которого определялись в соответствии с технологией их изготовления [3, 4].

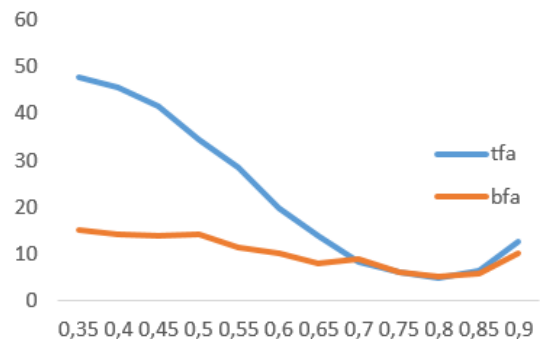


Рисунок 2 – Освещенность внешнего кольца фотометрического изображения в зависимости от эксцентриситета ЭР для прошедшего (bfa) и отраженного света (tfa)

Анализ полученных данных свидетельствует об определённой корреляции освещенности различных зон фотометрических изображений со значениями RMS по осях X и Y от эксцентриситета ЭР [7] и требует дальнейшего изучения.

#### Литература

1. Безугла Н.В. Просторова потокова біометрія середовищ еліпсоїдальними рефлекторами / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Ю.В. Чмир // Електроніка і зв'язок. – 2014. – Том 19. – № 6 (83). – С. 87–93.

2. M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, S. Kostuk, «Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors», *Devices and Methods of Measurements*. 9(1):56–65, 2018.

3. Безуглий М.О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М.О. Безуглий, І.І. Синявський, Н.В. Безугла, А.Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування, 2016. – № 2 (52). – С. 76–81.

4. Безуглий М.О. Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів / М.О. Безуглий, Лінючева О.В., Безуг-

ла Н.В., Бик М.В., Костюк С.А // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування, 2017. – № 1 (53). – С. 62–69.

5. Программы расчета оптических систем [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа к ресурсу: <http://optdesign.narod.ru/programs.htm>.

6. M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, I.V. Helich, «Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media», *Appl Opt.*, no. 56 (30), pp. 8520–8526, 2017.

7. Helich I.V. Features of aberrational analysis of ellipsoidal Reflectors to optical biomedical diagnostic / I.V. Helich. – Minsk, 2017.

УДК 621

**CONTINUOUS-WAVE MICROCHIP LASER OPERATION OF Yb-DOPED GALLIUM GARNETS**  
**J.M. Serres,<sup>1</sup> V. Jambunathan,<sup>2</sup> P. Loiko,<sup>1,3</sup> X. Mateos,<sup>1,4</sup> H. Yu,<sup>5</sup> H. Zhang,<sup>5</sup> J. Liu,<sup>6</sup> A. Lucianetti,<sup>2</sup>**  
**T. Mocek,<sup>2</sup> K. Yumashev,<sup>3</sup> U. Griebner,<sup>4</sup> V. Petrov,<sup>4</sup> M. Aguiló,<sup>1</sup> F. Díaz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Física i Cristal·lografia de Materials i Nanomaterials, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain

<sup>2</sup> HiLASE Centre, Institute of Physics CAS, Dolní Březany, Czech Republic

<sup>3</sup> Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>4</sup> Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy, Berlin, Germany

<sup>5</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, China

<sup>6</sup> College of Physics, Qingdao University, Qingdao, China

Ytterbium (Yb<sup>3+</sup>) ions are attractive for high-power, efficient and wavelength-tunable laser operation near 1 μm. Yb-lasers enable power scaling due to a low quantum defect (Stokes shift) between the pump λ<sub>p</sub> and laser λ wavelengths and because they can be pumped with commercially available, high-power InGaAs laser diodes emitting at 930–980 nm. The Yb<sup>3+</sup> ion is also free of unwanted parasitic processes such as excited-state absorption and up-conversion and it typically shows very high luminescence quantum yield leading to exceptionally high laser efficiency (> 80%). One of the hosts for Yb<sup>3+</sup> doping are the cubic ordered and disordered garnets. They possess quite good thermo-optical and thermo-mechanical properties as well as relatively high thermal conductivity.

In the present report, we compare the microchip laser performance of a series of Yb-doped gallium garnets with ordered, Yb:Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Yb:YGG) and Yb:Lu<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Yb:LuGG) [1-3], as well as disordered, Yb:Ca<sub>3</sub>(Nb<sub>1.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>)Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (Yb:CNGG) and Ca<sub>3</sub>Li<sub>y</sub>Nb<sub>1.5+y</sub>Ga<sub>3.5-2y</sub>O<sub>12</sub> (Yb:CLNGG) [4-6], crystal structure.

The Yb:LuGG and Yb:YGG crystals were grown in an oxygen atmosphere by the optical floating zone method, and Yb:CNGG and Yb:CLNGG ones were grown by the Czochralski method. From the as-grown bulks, rectangular samples were cut along the [111] crystallographic direction. Their thickness, aperture and doping level are specified in Table 1. The samples were wrapped with indium foil to improve the thermal contact and mounted in a water-cooled copper holder kept at ~12 °C.

Table 1. Compositional and Geometrical Parameters of the Studied Laser Crystals

| Crystal  | Dopin g, at.% | N <sub>Yb</sub> , 10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> | Thickness, mm | Apertur e, mm <sup>2</sup> |
|----------|---------------|-----------------------------------------------------|---------------|----------------------------|
| Yb:LuGG  | 7.13          | 9.4                                                 | 6.00          | 3 × 3                      |
| Yb:YGG   | 7.35          | 9.7                                                 | 6.02          | 3 × 3                      |
| Yb:CNGG  | 5.80          | 7.1                                                 | 8.00          | 5 × 5                      |
| Yb:CLNGG | 4.30          | 5.3                                                 | 3.14          | 3 × 3                      |

The microchip laser cavity consisted of a flat pump mirror (PM), AR coated for 0.9–1.0 μm and HR coated for 1.02–1.20 μm, and a set of flat output couplers (OC) with transmission T<sub>OC</sub> = 1 %, 5 % or 10 % at the laser wavelength. The cavities contained no air gaps so that their lengths were equal to the geometrical length of the crystals. The fiber-coupled InGaAs diode was used, nominally emitting at around ~932. The pump beam was focused into the crystals with a lens assembly having a reimaging ratio of 1:1 and a focal length of 30 mm. The diode had a fiber core diameter of 105 μm and N.A. of 0.14. The diode provided a maximum output power of 25 W. The pump spot sizes in the focus w<sub>p</sub> and confocal parameter 2z<sub>R</sub> was then ~52 μm/1.0 mm. The crystals were pumped in a single-pass configuration.

The pump saturation intensity for the studied crystals was estimated to be ~20 kW/cm<sup>2</sup>. For Yb:YGG, Yb:LuGG, and Yb:CNGG the pump absorption at high pump level was 60–70 % while for Yb:CLNGG it was ~50 % due to the shorter length of the crystal.

In Fig. 1, the absorption σ<sub>abs</sub> and stimulated-emission cross-sections σ<sub>SE</sub> spectra for the studied crystals are shown. The peak σ<sub>SE</sub> values are slightly

higher for Yb:YGG and Yb:LuGG ( $\sim 2.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) but Yb:CNGG and Yb:CLNGG provide broader emission bands (FWHM  $\sim 24 \text{ nm}$ ).

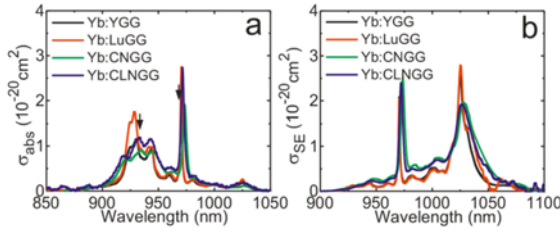


Fig. 1. Absorption (a) and stimulated-emission (b) cross-section spectra of the studied Yb-doped gallium garnets

Microchip laser operation was achieved with all garnets using the two described pump diodes. The input-output dependences for these lasers pumped at  $\sim 932 \text{ nm}$  are shown in Fig. 2 with respect to the absorbed power. The Yb:LuGG crystal demonstrated superior laser performance. For  $T_{OC} = 10\%$ , a maximum output power of 8.97 W was achieved at 1040 nm with a slope efficiency  $\eta = 75\%$ . The optical-to-optical efficiency was 63% and the laser threshold was at  $P_{abs} = 1.22 \text{ W}$ . Using OCs with 5% and 1% transmission, the slope efficiency dropped to 69% and 62%, respectively.

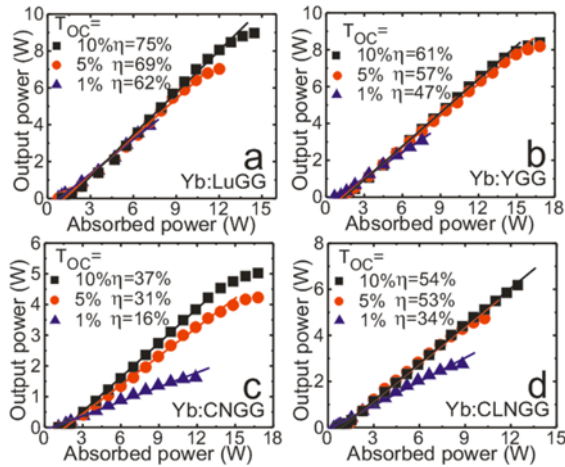


Fig. 2. Input-output dependences for microchip lasers based on Yb:LuGG (a), Yb:YGG (b), Yb:CNGG (c) and Yb:CLNGG (d) crystals. The pump wavelength is  $\sim 932 \text{ nm}$ ,  $\eta$  – slope efficiency

The Yb:YGG crystal showed slightly inferior laser performance. The maximum output power was 8.40 W at 1042 nm with  $\eta = 61\%$  for  $T_{OC} = 10\%$ . For Yb:CNGG and Yb:CLNGG microchip lasers, substantially lower output power was achieved. This decrease is attributed to the stronger thermo-optic effects in these crystals. The maximum output power generated with Yb:CLNGG was 6.1 W at 1039 nm with  $\eta = 54\%$  and with Yb:CNGG it was 5.1 W at 1051 nm with  $\eta = 37\%$  (both for  $T_{OC} = 10\%$ ).

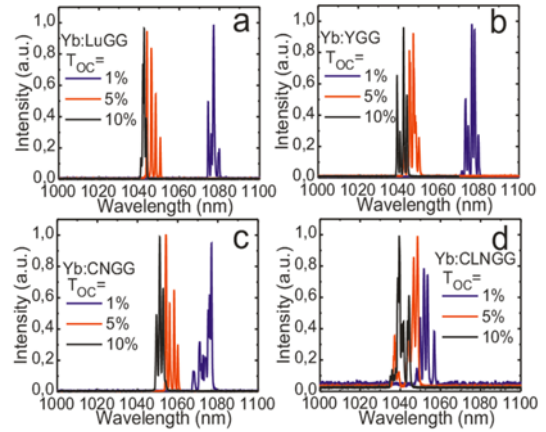


Fig. 3. Microchip laser emission spectra for Yb:LuGG (a), Yb:YGG (b), Yb:CNGG (c) and Yb:CLNGG (d) diode-pumped at 932 nm. The absorbed power is 7 W

For all crystals, thermal roll-over in the output dependences is observed. The range of  $P_{abs}$  corresponding to a linear input-output curve narrows at lower  $T_{OC}$ . For Yb:LuGG, Fig. 2(a), thermal roll-over starts at  $P_{abs} \sim 7, 11$  and  $13 \text{ W}$  for  $T_{OC} = 1\%$ ,  $5\%$  and  $10\%$ , respectively.

Typical laser emission spectra for all microchip lasers are shown in Fig. 3. All of them show a multi-peak behavior. For Yb:YGG and Yb:LuGG, the use of  $T_{OC} = 1\%$  corresponded to laser oscillation at  $\sim 1080 \text{ nm}$  and with  $5\%$  and  $10\%$  OCs, laser emission occurred at  $\sim 1050$  and  $1040 \text{ nm}$ , respectively. For Yb:CNGG and Yb:CLNGG, the shift of the emission wavelength was less pronounced. In the latter case,  $\lambda_1$  was  $\sim 1052, 1048$  and  $1039 \text{ nm}$  for  $T_{OC} = 10\%$ ,  $5\%$  and  $1\%$ , respectively.

The recorded laser emission spectra help to explain the peculiarities of the thermal rollover in the output dependences of the studied microchip lasers. The reason is a relatively high heat load under 932 nm pumping, as well as strongly localized heat deposition (as  $w_p$  was only  $\sim 52 \mu\text{m}$ ). In particular, for Yb:LuGG laser, the value of  $\eta h$  estimated as Stokes shift, was 13.2%, 10.9% and 10.2% for 1%, 5% and 10% OC, respectively. Thus, stronger heat load is expected for lower  $T_{OC}$ , leading to a thermal roll-over at lower  $P_{abs}$ , as seen in Fig. 3.

The observed blue-shift of the laser wavelength with the increase of  $T_{OC}$  is typical for quasi-three-level Yb lasers and is explained with the gain cross-section,  $\sigma_g$ , spectra, Fig. 4. Here,  $\sigma_g = \beta \sigma_{SE} - (1 - \beta) \sigma_{abs}$  where  $\beta$  is the inversion ratio,  $\beta = N_2/N_0$  where  $N_2$  and  $N_0$  are the number of ions excited in the upper laser level and overall number of ions, respectively. The gain spectra of Yb:LuGG, Yb:YGG and Yb:CNGG at very low  $\beta$ , typical for CW microchip lasers, are flat and very broad in the range from  $\sim 1060$  to  $1080 \text{ nm}$ . For Yb:CLNGG, this range extends from 1040 to 1080 nm. With the increase of  $\beta$ , an absolute maximum is formed in the gain spectra and its position is shifting from 1045 to 1030 nm.

These spectral features are in good agreement with the recorded laser emission spectra, Fig. 3.

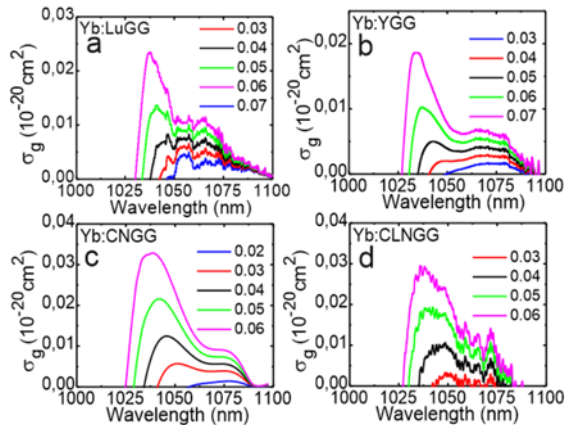


Fig. 4. Calculated gain cross-sections of Yb:LuGG (a), Yb:YGG (b), Yb:CNGG (c) and Yb:CLNGG (d) crystals for different inversion ratios  $\beta$

### References

1. W.Han, K. Wu, X. Tian, L. Xia, H. Zhang, and J. Liu, «Laser performance of ytterbium-doped

gallium garnets: Yb:Re<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Re = Y, Gd, Lu)», *Opt. Mater. Express* 3(7), 920–927 (2013).

2. Y.Zhang, Z.Weil, Q.Wang, D. Li, Z. Zhang, H. Yu, H. Zhang, J. Wang, and L.Lv, «Diode-pumped efficient continuous-wave Yb:Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser at 1035 nm», *Opt. Lett.* 36(4), 472–474 (2011).

3. Y. Zhang, Z. Wei, B. Zhou, C. Xu, Y. Zou, D. Li, Z. Zhang, H. Zhang, J. Wang, H. Yu, K. Wu, B. Yao, and J. Wang, «Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser», *Opt. Lett.* 34(21), 3316–3318 (2009).

4. J.H. Liu, Y. Wan, Z. Zhou, X. Tian, W. Han, and H. Zhang, «Comparative study on the laser performance of two Yb-doped disordered garnet crystals: Yb:CNGG and Yb:CLNGG», *Appl. Phys. B* 109(2), 183–188 (2012).

5. J. Liu, W. Kong, X. Tian, Zh. Zhou, W. Han, Sh. Han, and H. Zhang, «Efficient laser oscillation of a new disordered Yb:CLNGG crystal», *Laser Phys. Lett.* 9(5), 394–397 (2012).

6. A. Schmidt, U. Griebner, H. Zhang, J. Wang, M. Jiang, J. Liu, and V. Petrov, «Passive mode-locking of the Yb:CNGG laser», *Opt. Commun.* 283(4), 567–569 (2010).

**Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ  
ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 336

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МАРКЕТИНГОВОЙ СТРАТЕГИИ**

**Афанасенко А.В.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В процессе реализации маркетинговой стратегии предприятия может возникнуть множество непредвиденных обстоятельств. Поэтому одной из важных задач маркетинга является оценка эффективности маркетинговой деятельности предприятия, от своевременности и качества которой зависит положение на рынке и будущее развитие компании.

Оценка экономической эффективности маркетинговой деятельности – составная часть контроля маркетинга. Контроль маркетинга – это оценка результатов реализации маркетинговых стратегий и планов и, в случае необходимости, корректировка стратегии для достижения поставленных целей.

Сперва руководство формулирует конкретные маркетинговые задачи, после чего прогнозирует планируемые результаты маркетинговой деятельности. Далее руководство компании представляет их с планом, выявляет отклонения и их причины, производит корректировку плана/стратегии. Наконец, измеряются конечные результаты деятельности, проводится анализ, предпринимаются корректирующие действия для устранения отклонений от плана, для чего зачастую может потребоваться полный или частичный пересмотр маркетинговой стратегии.

Задача оценки эффективности маркетинга – выявление тех областей, где существуют проблемы, а также открываются новые возможности, формирование рекомендаций по повышению эффективности маркетинговой деятельности.

Оценивать эффективность стратегии требуется еще на стадии планирования. Один из способов обоснования соответствия цели определенным параметрам – метод «S.M.A.R.T.» Анализ экономической эффективности маркетинговой деятельности проводится со следующими целями:

1. Обосновать эффективность маркетинговой стратегии на стадии разработки или принятия решения;

2. Определить конечную эффективность маркетинговой деятельности по прошествии определенного периода времени, так как для оценки конечной эффективности требуются фактически достигнутые результаты.

Для определения эффективности маркетинговой деятельности предприятия, необходимо в процессе разработки стратегии выделить критерии, с помощью которых будет осуществляться

контроль результатов. Существуют различные мнения по поводу определения показателей для оценки эффективности маркетинговой деятельности. Некоторые ученые полагают, что применение количественных методов при оценке фактических результатов маркетингового мероприятия затруднительно, так как не все цели можно сформулировать количественно, например, поддержание престижа фирмы, измерение реакции потребителей на рекламу и др.

Для того чтобы определить эффективность стратегии маркетинга или какого-то конкретного маркетингового мероприятия, необходимо, чтобы цель была сформулирована количественно. Например, цель может быть сформулирована следующим образом «в результате проведения рекламной акции количество уникальных посетителей должно увеличиться на 3 % за один месяц». Поскольку такая цель сформулирована количественно, то проверить уровень ее достижения не составит труда, также не сложно будет сопоставить результат с затратами на данное мероприятие.

Наиболее эффективно использовать в процессе оценки и качественные и количественные показатели. Для удобства разделим показатели эффективности на три группы:

1. Показатели рыночной эффективности. Данные показатели оценивают внешние рыночные условия и привлекательность рынков. К ним относятся оценка рыночной конъюнктуры и доходности.

2. Показатели конкурентоспособности. Данные показатели характеризуют конкурентоспособность товаров или услуг предприятия. К ним относится эффективность деятельности фирмы в отношении цены, качества продукции/услуг, бренда.

3. Показатели деятельности клиента. Показатели, демонстрирующие эффективность сотрудничества с потребителями. К ним относится оценка удовлетворенности, лояльности, осведомленности клиентов. Каждый из этих показателей играет важную роль в переходе компании на более высокий уровень эффективности и рентабельности маркетинга.

Маркетинговые показатели можно разделить на запланированные, текущие и конечные, и те, и другие очень важны, особенно первые, так как они являются основными индикаторами эффективности деятельности. Рассмотрим способы оценки более детально.

1. Прогнозирование результатов маркетинговой деятельности.

При разработке стратегии в условиях неопределенности и риска требуется проводить прогнозирование. Прогнозирование представляет собой процесс разработки прогнозов – научно-обоснованных суждений о возможных состояниях объекта в будущем, об альтернативных путях и сроках его существования. Разработка прогноза требует не только изучения внешней среды, но и предположения динамики ее развития ситуации в будущем, основанное на имеющейся информации. Поскольку реакция клиентов на изменения, которые никогда ранее не проводились, плохо поддается прогнозированию, рассмотрим подробнее показатели рынка и конкурентоспособности.

Оценку конкурентоспособности можно провести с использованием принципов модели Розенберга, которые исходят из того, что потребители оценивают все товары и услуги с точки зрения их пригодности для удовлетворения своих потребностей. Для каждого рынка/сегмента рынка определяется ряд важных для потребителя показателей. Весомость выбранных показателей определяется экспертом с помощью цифровой шкалы, например, от 1 до 5, где:

1 – показатель не характерен для предприятия;

5 – показатель очень характерен для предприятия.

Далее весомость сравнивается с идеальным показателем (идеальным ожиданием потребителя), оценивается степень выраженности показателя, выявляются наиболее перспективные рынки/сегменты рынка.

Далее следует провести анализ рыночной конъюнктуры для конкретных рынков/сегментов рынка. Исследование конъюнктуры рынка предполагает анализ размера рынка, показателей спроса на товары, показателей давления конкурентов, показателей давления потребителей и т. д.

Оценку доходности можно провести различными способами – при помощи экспертных оценок, на основе предыдущего опыта работы на различных рынках, статистических данных. Показатели выбирают для каждого предприятия индивидуально.

2. Оценка текущая и конечная оценка эффективности маркетинговой стратегии.

Для дальнейшей оценки эффективности маркетинговой стратегии предприятия, вышедшего на зарубежный рынок, требуется оценить динамику изменения показателей в определенном временном отрезке. Также следует рассмотреть способ количественной оценки конечного результата маркетинговой деятельности предприятия методом сопоставления достигнутого эффекта (который, чаще всего, выражается в виде прибыли/дохода) к затратам.

Для этого требуется:

1. Определить затраты, связанные с процессом выхода предприятия на зарубежный рынок (составление сметы затрат на маркетинг, в которой представлены все статьи затрат);

2. Определить эффект (результат). Теоретически под эффектом маркетингового мероприятия можно понимать его цель, выраженную количественно, но маркетинговая стратегия предприятия включает большое количество различных мероприятий, которые имеют различные цели. Поэтому целесообразно выбрать один главный показатель и через него просчитать эффективность.

Таким образом, оценку экономической эффективности маркетинговой деятельности можно провести с помощью построения математической формулы. В общем виде формула выглядит следующим образом:

$$Эм = \Delta Пм / Зм,$$

где: Эм – эффективность маркетингового мероприятия;  $\Delta Пм$  – прирост прибыли за счет данного маркетингового мероприятия;  $Зм$  – затраты на данное маркетинговое мероприятие.

Наконец, располагая множеством показателей эффективности маркетинговой стратегии, можно провести анализ позиции компании на рынке за различные периоды при помощи матрицы Mc Kinsey, проследить динамику изменений.

#### Литература

1. Маркетинг: [перевод с английского] / Роман Хибинг, Скотт Купер. – Москва: Эксмо, 2010. – 846 с.

2. Маркетинговые исследования: учебное пособие для студентов / Т.Г. Зорина, М.А. Слонимская. – Минск : Белорусский государственный экономический университет, 2010. – 410 с.

УДК 339.9 (519)

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ И КРЕАТИВНАЯ ЭКОНОМИКА

Акунец В.П., Зысь Т.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Современное состояние экономики Республики Беларусь характеризуется возрастанием роли государственного управления наукой, производством и технологиями. Роль государства, как главного субъекта, в переходный пе-

риод не уменьшается, а возрастает. В связи с новыми рыночными условиями производственной деятельности возрастают требования, предъявляемые к персоналу предприятий. От персонала требуется постоянное развитие и ин-

новационные подходы при принятии управленческих решений.

Креативное управление основано на индивидуальных знаниях и предполагает наличие людей, способных к нетривиальному мышлению и неординарным действиям. Как правило, в производственных коллективах таких людей всегда не хватает. Производственный процесс на предприятиях достаточно жестко формализован типовыми технологическими процессами. Однако в настоящее время необходимо не только производить товары в соответствии со стандартами, но и обеспечить их реализацию в соответствии с запросами потребностей. Для этого нужны инновационно активные специалисты. Иновационно активный специалист, как правило, берет на себя ответственность, обладает научным мировоззрением и креативностью и способен управлять собой с целью достижения не только личных интересов, но и целей коллектива предприятия.

Особенностью современного состояния экономики в нашей стране является то, что экономика приобретает характер креативности. Креативная экономика направлена на дальнейшее развитие новых вариантов бизнеса. Креативность также и умение в необычном ключе рассмотреть и оригинально решить проблему, – это умение найти новую технологию, – это своего рода не стандартный подход в бизнесе. Есть два варианта развития креативности:

- первый, наиболее легкий предполагает зарядиться чужим креативом, то есть привлечь инноватора;

- второй, более трудный означает создать свое решение, свою новую технологию в соответствии с инвестированным капиталом, но проблема будет решена быстрее.

Второй вариант более тернистый, требует проведения большого количества научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Чтобы реализовать второй вариант необходимо создать условия и создать систему развития персонала.

Следует отметить, что на многих предприятиях отсутствует целостная система развития персоналом. Как правило, решаются локальные задачи, связанные с повышением квалификации отдельных работников.

Сущность системы развития персонала заключается в том, чтобы коллектив представлял собой сплоченную команду специалистов, объединенных реализацией конкретной идеи. Например, наш электробус – лучший в мире. С этой целью с помощью идеологических методов можно изменить традиционные подходы к решению проблем, сформировать определенное научное мировоззрение сотрудников, найти креативное решение.

Для достижения цели производственной и коммерческой деятельности на предприятиях необходимо создавать систему развития персонала. Система развития персонала должна быть направлена на достижение максимального дохода предприятия. Система развития персонала включает следующие этапы: сбор информации о персонале; оценка соответствия имеющегося персонала целям производства; планирование потребности в персонале; планирование о привлечении, адаптации и высвобождении персонала; планирование обучения, переподготовки и повышение квалификации персонала; планирование деловой карьеры, служебно-профессионального продвижения.

Система развития персонала может быть реализована в результате непрерывного профессионального обучения.

Однако нельзя понимать систему развития персоналом в узком смысле и сводить ее только к профессиональному обучению и повышению квалификации. Система развития персонала – это сложная целенаправленная деятельность всего коллектива, направленная на выход предприятия на более высокий уровень по показателям конкурентоспособности продукции или оказываемых услуг.

Одной из важнейших задач управления персоналом является определение концептуальных положений белорусской модели менеджмента [2, с. 40]. В соответствии с концепцией социально-экономического развития Республики Беларусь системная модель национальной экономики рыночного типа в качестве одной из своих доминант предусматривает переход на инновационный тип воспроизводства с интенсивным внедрением новых технологий информационного общества. В связи с этим к управлению персоналом выдвигаются новые требования.

Контуры «белорусской модели» обрисовал в своем выступлении в декабре 2017 г. на втором съезде ученых Президент Республики Беларусь. Он выделил следующие ее особенности: мощная и эффективная государственная власть; развитие частного сектора наряду с государственным, но не в ущерб национальным интересам; приватизация государственной собственности, но не допускается превращение ее в самоцель; ориентация на интеграционные процессы; приоритет развития социальной сферы.

В связи с поставленными задачами можно сформулировать основополагающую идею, что целью новой системы управления персоналом является формирование научного мировоззрения и развития человека.

Решение этой проблемы невозможно без применения гуманитарных методов воздействия на персонал.

При разработке концепции гуманитарных методов управления персоналом необходимо учи-



тывать новые условия управления трудовыми коллективами.

Концепция гуманитарного управления персоналом – это новое научное направление в менеджменте. В процессе управления люди должны быть доброжелательными. Это способствует развитию каждого человека как гармоничной личности.

В Республике Беларусь можно сформулировать определенные идеи, позволяющие ускорить темпы роста экономики. Одной из таких идей может быть разработка оптимальной системы производственных нормативов на предприятии и их соответствие социальным нормам и нормативам. Под социальными нормами понимаются такие показатели как средняя заработная плата, бюджет прожиточного минимума и др. В плановой экономике между экономическими показателями, производственными параметрами и социальными нормами сложились определенные пропорции.

При формировании рыночных отношений в системе производственных нормативов возникли диспропорции. Особенно сложное положение сложилось в подсистеме трудовых нормативов и нормативов заработной платы. Следствием игнорирования этой проблемы является относительное снижение покупательной способности потребителей. Идея заключается в том, чтобы усовершенствовать систему производственных нормативов, исследовать пропорции между экономическими показателями в новых реалиях с учетом опыта других стран.

Идеология на уровне производственного предприятия – это своеобразная система правовых, нравственных, социальных и других категорий, выражающих интересы и потребности руководства предприятия. Большой интерес вызывают идеи, высказанные Г. Фордом, – дать людям дешевый, доступный автомобиль: «... мы в состоянии снизить цену на наш продукт в соответствии с покупательной способностью». Для того, чтобы реализовать эту идею, Форду пришлось выработать целый комплекс своеобразных принципов, методов и приемов.

В условиях формирования рыночных отношений предприятия преследуют вполне конкрет-

ные цели, связанные с получением максимальной прибыли, повышением конкурентоспособности продукции, расширением рынка сбыта. Часто на предприятии отсутствует четкая система экономических нормативов и стимулов, показателей, характеризующих пути достижения цели.

К идеологическим методам управления относятся: метод предварительной проработки идеи; метод формирования традиций; метод личного примера и убеждения; метод агитации и пропаганды; метод дипломатии и переговоров; метод советов и совещаний.

Целью корпоративного менеджмента является формирование искренней, сознательной, обостренной, особо выделяемой в сознании человека высокой ответственности за цели фирмы. Для этого все сотрудники должны правильно понимать основные идеи управления фирмой.

Идеологические методы управления в системе развития персоналом – мощная динамическая система правовых, нравственных, гуманитарных и социальных взглядов, направленных на достижение конкурентных целей предприятия, фирм, общественных движений. В настоящее время к идеологическим методам управления требуется принципиально новый научный подход, учитывающий возросший профессиональный уровень персонала.

Ключевой целью системы развития персонала является повышение профессионального уровня не отдельных работников, а повышение конкурентоспособности предприятия. Единой, общепринятой методики определения профессионального уровня персонала не существует каждый руководитель применяет свои критерии оценки профессионального уровня персонала.

#### Литература

1. Арутюнов, В.В. Управление персоналом : учеб.пособие / В.В. Арутюнов, И.В. Волынский. – Ростов-на-Дону, 2012. – 448 с.
2. Бабосов Е.М. Инновационные устремления. / Беларуская думка. – 2017. – № 12.
3. Лукашенко, А.Г. Наша будущая модель – Беларусь интеллектуальная. / Беларуская думка. – 2017. – № 12 – С. 3–19.

УДК 378

### СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ УЧЕБНО – МАТЕРИАЛЬНОЙ БАЗЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТА ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Бондарев В.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

Качество учебно-методической работы вуза определяется способностью его выпускников решать свои профессиональные задачи.

Исходя из этого, целью создания УМБ является формирование модели профессиональной

среды, в рамках которой выпускник будет выполнять должностные обязанности в течение ближайших 2-3 лет. Развитие УМБ предполагает систему постоянно действующих организационно-технических мероприятий, обеспечивающих

адекватность элементов УМБ различного уровня (вузовского, факультетского, кафедрального) объектам будущей деятельности выпускников с учетом изменений, происходящих в области технической защиты информации.

УМБ должна также обеспечивать проведение научных исследований и подготовку научно-педагогических и научных кадров.

Учитывая значимость УМБ в решении задач подготовки специалистов в области разработки и применения технических средств защиты информации (ТСЗИ) и необходимость вложения значительных материальных средств в ее развитие и поддержание, необходим системный подход в определении замысла и формировании решения на ее развитие.

При этом УМБ должна рассматриваться не как самостоятельная система, а как материальная основа учебно-методической среды, в рамках которой осуществляется формирование профессионального облика выпускника вуза, удовлетворяющего квалификационным требованиям. Формирование УМБ должно базироваться на следующих принципиальных положениях:

– наличие разработанной модели объекта будущей профессиональной деятельности выпускника;

– четкое определение для ближайших 2-3 лет работы выпускника основного содержания его деятельности, исходя из должностного предназначения (исходя из его специализации);

– создание на кафедре (в вузе) и в организации (на предприятии) взаимосогласованной учебно-методической среды, обеспечивающей достижение каждым выпускником поставленной цели его подготовки в определенное время с заданным качеством.

Только на основе данных принципиальных положений можно создать УМБ, обеспечивающую условия для самостоятельной реализации выпускниками своих инженерных, научных и гуманитарных знаний и умений в конкретный результат их профессиональной деятельности.

Таким образом, УМБ подготовки специалиста в области ТСЗИ можно определить как комплекс материальных и технических средств, составляющих основу профессиональной среды будущей служебной деятельности выпускников ВУЗа, и предназначенных для обеспечения подготовки слушателей по специальности (специализации) ТСЗИ в соответствии с государственным образовательным стандартом, квалификационными требованиями, учебными планами и программами, а также для выполнения научных исследований и подготовки научных и научно-педагогических кадров.

Формирование УМБ подготовки специалистов по ИБ, её использование в учебном процессе, обеспечение её коррекции и развития с учётом изменений, происходящих в области ИБ,

связано с решением многоплановых проблем. При этом существующий уровень состояния науки и техники, экономики страны, содержание и задачи обучения по данной специальности в ВУЗе, научный, педагогический, методический уровень учебного процесса, его финансирование обуславливают сейчас такое положение, при котором проблемы развития УМБ имеют множество неоднозначных, а зачастую весьма противоречивых решений. В основу формирования УМБ вуза предлагается положить принцип «от общего к частному», который в полной мере соответствует требованиям системного подхода. Суть его состоит в следующем:

– исходя из специализаций, по которым в вузе осуществляется подготовка специалистов по ИБ и исходя из количества выпускаемых ежегодно специалистов, формируется учебный полигон вуза (кафедры), на элементах которого осуществляется заключительный этап подготовки выпускников по должностному предназначению;

– для эффективного использования УМБ разрабатывается система обобщённых, комплексных и частных задач, отражающих квалификационные требования к выпускникам и обеспечивающих корреляцию общепрофессиональных дисциплин.

Основу УМБ, её сердцевину должны составлять объекты, на которых выпускники выполняют свои функциональные задачи.

Для практической подготовки слушателей по конкретной специализации создаются учебно-тренировочные комплексы (УТК).

Квалификационные задачи включают задачи трех типов: обобщенную (ОКЗ), комплексные (ККЗ) и частные (ЧКЗ).

ОКЗ отрабатывается на завершающем этапе обучения перед производственной практикой. Кроме того, ОКЗ составляет основу для формирования задач, решаемых в ходе дипломного проектирования.

ККЗ и ЧКЗ по отношению к ОКЗ являются задачами более низкого уровня конкретизации слушателями в ходе практических занятий.

Таким образом, замысел развития УМБ подготовки специалиста по ИБ должен включать:

– перечень объектов (элементов объектов) будущей профессиональной деятельности выпускника ВУЗа по специальности (специализации) ИБ;

– структуру данных объектов (или их элементов);

– исходя из имеющихся сил и средств, разработанную схему организационно - технического построения каждого объекта (его элемента);

– сформированную систему задач, отражающих основное содержание профессиональной деятельности выпускника.

Подобная «емкость» УМБ обеспечивает выполнение учебного плана на заключительном учебе в рамках отведенного бюджета времени.

Таким образом, в основу разработки учебно-материальной базы подготовки специалиста по ИБ в первую очередь должна быть положена

концепция моделирования профессиональной среды, определяющей деятельность выпускника.

УДК 658

**ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО ПОЛОЖЕНИЯ В СФЕРЕ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ И ВТОРИЧНЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
**Мелюшин П.В., Бондарюк А.А.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В современном мире для любого государства, и для Республики Беларусь в том числе, приоритетным направлением в рамках социально-экономического развития является повышение качества жизни граждан. Одними из важнейших аспектов качества жизни в стране являются вопросы экологии и окружающей среды. В соответствии с Национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года, одной из рискованных областей развития государства в части экологического и природного компонента была выделена образование токсичных отходов и отсутствие мощностей (возможностей) для их переработки [1].

Республике Беларусь, основываясь на Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития и мировых тенденциях в сфере обращения с отходами, была разработана Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года [2].

Также в рамках Национальной стратегии по обращению с ТКО проведен анализ текущего состояния в области обращения с ТКО и вторичных материальных ресурсов в Республике Беларусь. Общий показатель переработки ТКО гораздо ниже, чем установлен согласно Директиве 2008/98/ЕС. 14 марта 2017 года были установлены следующие требования: достижения показателя 65 % утилизации от общего количества отходов и 10 % допустимого захоронения отходов [3].

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь №313 «О некоторых вопросах обращения с отходами потребления», координацию деятельности в сфере обращения со вторичными материальными ресурсами осуществляет Министерство жилищно-коммунального хозяйства, которое в этих целях создает государственную некоммерческую специально уполномоченную организацию – оператора в сфере обращения со вторичными материальными ресурсами [5].

Главной задачей в решении проблемы управления ТКО и ВМР является формирование эффективной комплексной инфраструктуры, по-

строенной на основе государственно-частного партнерства.

Построение четкой эффективно функционирующей системы обращения с ТКО и ВМР в странах Европейского союза базировалось на нескольких основополагающих этапах:

1. На уровне Европейского союза были разработаны и внедрены основополагающие законодательные и нормативно-правовые акты в сфере обращения с отходами – 6-я Экологическая Программа Действий № 1600/2002/ЕС, Директива Европарламента и Совета по Отходам 2006/12/ЕС от 5 апреля 2006 г, Рамочная Директива 2008/98/ЕС об отходах и т. д. В рамках данных директив и программ были сформулированы основные положения, направления, цели, задачи и способы решения проблем эффективного обращения с отходами.

2. Конкретные меры по формированию эффективной системы обращения с отходами выглядели следующим образом. Во-первых, была сформирована культура сортировки бытовых отходов у населения. Население облагается тарифами на вывоз мусора в зависимости от площади жилья, налажена система раздельного сбора в отдельные мусорные контейнеры, в случае недобросовестной сортировки мусора жильцы могут получить штраф. Во-вторых, производители продукции также уплачивают дополнительные тарифы, пошлины и лицензионные сборы на производимую упаковку для продукции. Таким образом производители компенсируют затраты на последующую утилизацию упаковки, стимулируются к минимизации объемов самой упаковки и использованию экологически эффективных материалов. В-третьих, были созданы системы национальных и региональных операторов, которые решают проблемы утилизации отходов, координируют свои усилия с соответствующими государственными программами.

3. На этапе планирования и создания программ и директив была заложена долгосрочность и комплексность решения поставленных задач. Первоочередной задачей было создание комплексных систем управления отходами на национальном и федеральном уровнях.

Концепция комплексного управления отходами предполагает сепарацию отходов по компонентам на начальной стадии и их последующую раздельную утилизацию наиболее экономичными и экологическими способами, т. е.: создание системы управления, оценка объема и состава отходов в настоящем и будущем, оценку существующих методов утилизации и определения направлений их развития и модернизации, оценку существующих вариантов утилизации отходов и возможности их интеграции в комплексные региональные и национальные системы, проведение разъяснительной и воспитательной работы с населением, определение источников финансирования проектов, мониторинг сложившейся ситуации и оценка новых альтернатив.

В настоящее время в Республике Беларусь предприняты определенные шаги по созданию комплексной системы обращения с ТКО и ВМР. Национальной стратегией по обращению с ТКО и ВМР определено несколько комплексов (модулей) по совершенствованию существующей системы обращения с ТКО и ВМР, разработан соответствующий инвестиционный план. Перегрузочные станции должны стать одним из основных элементов инфраструктуры системы обращения с ТКО. Исходя из общей массы ежегодно образуемых в Республике Беларусь ТКО и средней пропускной способности перегрузочной станции в 60 тонн в день (22 000 тонн в год), в период до 2035 года может потребоваться строительство до 117 перегрузочных станций. Запланировано создание необходимых условий к внедрению технологий энергетического использования ТКО (сжигание смешанных отходов, использование RDF-топлива в цементной промышленности и котельных), а именно принятие ряда законодательных норм и создание заводов по производству RDF-топлива.

В соответствии с выделенными направлениями, разработан приблизительный инвестиционный план, согласно которому на реализацию данных мероприятий необходимо привлечение значительных объемов финансовых средств. Весь объем инвестиций в 2017 – 2035 годах оценивается в 1224,1 млн. евро, в том числе по периодам (в среднем): 2017 – 2020 годы – 277,6 млн. евро; 2021 – 2025 годы – 382,2 млн. евро; 2026 – 2035 годы – 564,3 млн. евро.

УДК 005.334

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

Будинайте Е.Е.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Современные геополитические процессы оказывают влияние на деловой мир, внося в привычный уклад бизнесменов непредсказуемость и неустойчивость, повышающие риски предпри-

Структура инвестиций состоит из прямых иностранных инвестиций (34,4%), фонда оператора (существующие платежи, 18,7%) и фонда оператора (специальная плата за захоронение, 46,9%) [2].

Таким образом, в Республике Беларусь проблема эффективного обращения с отходами является одной из актуальных проблем на повестке дня. Несмотря на то, что на данный момент преобладает административно-плановая структура, настроенная в основном на захоронение отходов на полигонах, предпринимаются меры по модернизации и усовершенствованию существующей системы по Европейскому образцу, где большинство отходов повторно используется, перерабатывается, используется для производства энергии. Модернизация и усовершенствование существующей системы требует существенных материальных и временных затрат. Также важно осознание и выполнение программы эффективного обращения с отходами на всех уровнях, начиная от отдельных граждан до крупных предприятий.

Проблема экологии и окружающей среды, как и проблема обращения с отходами, является проблемой глобальной. Поэтому крайне важно, чтобы как каждый индивидум, так и страны в целом, вносили максимальный вклад в сохранение окружающей среды, так как от этого зависит существование как природы, так и современного человеческого общества.

### Литература

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года, Минск, 2015, стр. 11.
2. Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года (утверждено Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 28.07.2017 № 567).
3. <https://www.bna.com/european-parliament-backs-n57982085187/>
4. Утверждено Постановление Совета Министров Республики Беларусь 21.04.2016 № 326 государственная программа «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2016 – 2020 годы.
5. Указ президента Республики Беларусь от 11 июля 2012 г. № 313 «О некоторых вопросах обращения с отходами потребления».

нимательской деятельности. Западные компании, вне зависимости от сектора экономики и величины бизнеса, уделяют все больше внимания организации систем управления рисками.

Управление рисками обеспечивает предприятия механизмом определения дополнительных возможностей деятельности, а также предупреждает о потенциальных «ловушках». Адекватная и своевременная оценка рисков дает промышленным компаниям четкое представление о влиянии, которому они могут подвергаться, какого бы рода риски ни реализовывались – внутренние или внешние, ретроспективные или перспективные, качественные или количественные. Грамотное управление рисками позволяет расширить перспективу планирования, максимально защищая компанию от невыполнения стратегических задач.

Примечательно, что на зарубежных производственных предприятиях внимание управляющих сосредоточено в основном на коммерческих рисках, влияющих на повседневную деятельность, в то время как отечественный рынок больше подвержен влиянию рисков социально-политических, административно-законодательных и финансовых. Не всегда управление рисками возложено на самостоятельные структурные единицы (департаменты, подразделения, отделы). Часто оценка рисков и разработка мер по их снижению и вовсе поручается сторонним организациям – консультантам, аудиторам, аутсорсинговым компаниям.

В управлении рисками в той или иной мере должны быть задействованы практически все сотрудники (вне зависимости от занимаемых должностей). Получившее распространение процессно-ориентированное управление организациями, основным смыслом которого является повышение эффективности деятельности и предотвращение любых необоснованных потерь, естественным образом «вживляет» управление рисками в каждый из бизнес-процессов (и тем более в каждый проект).

Достижением современности, безусловно, является автоматизация процесса управления рисками – от их идентификации до контроля результативности мер по их снижению. Специализированное программное обеспечение на основе методов статистического и экономического анализов давно востребовано на американском и европейском рынках. Разработаны как полнофункциональные автоматизированные системы управления рисками, так и отдельные модули, использование которых зависит от масштабов деятельности предприятий и их узкоспециальных потребностей.

Автоматизированные системы управления рисками (АСУР) способны выявлять проблемные места в бизнес-процессах, прогнозировать возможные ущербы и рассчитывать капитал, необходимый для покрытия издержек. Функционал АСУР позволяет накапливать и анализировать статистические данные, отслеживать неблагоприятные факторы, влияющие на деятельность организации, генерировать отчеты в виде диаграмм, таблиц, графиков, собирать и анализировать экспертное мнение, рассчитывать эффек-

тивность предпринимаемых мер по снижению рисков, в кратчайшие сроки моделировать десятки вариантов возможного развития событий с предоставлением количественных показателей.

Подавляющее большинство программ для управления рисками рассчитано для банковской и финансовой сферы. Однако деятельность производственных предприятий в области риск-менеджмента также не оставлена без внимания.

Англоязычных версий программного обеспечения для управления рисками на промышленных предприятиях бесчисленное множество. Здесь и Master Control Risk Analysis (США), и A1Tracker (США), Risk Gap (США), Active Risk Management ( Канада), Oodit Riskplan (Нидерланды) и пр. Практически все они рассматривают оценку рисков как самостоятельный процесс деятельности предприятия любой их сфер промышленности, увязанный со всеми остальными процессами, в том числе производственными и технологическими. Программы обеспечивают аудит и контроль бизнес-процессов, систематизируют претензионную работу, обеспечивают инструментами действий в не-предвиденных ситуациях, позволяют оценить риски в количественном выражении.

В последние годы появилось и русскоязычное программное обеспечение. В качестве примера хотелось бы привести разработку российской консалтинговой компании KRISS Consulting Group.

KG Risk (KG Управление рисками) – программный инструмент риск-менеджера (или другого сотрудника, выполняющего эту функцию), предназначенный для автоматизации управления рисками промышленных предприятий и нефинансовых организаций. В описании программного продукта значится, что методика построения данной системы управления рисками основана на методиках российской школы риск-менеджмента – Управления хозяйственным риском Центрального экономико-математического института Российской Академии наук.

Функциональными возможностями программы являются следующие:

- актуализация целей (холдинга, предприятия, подразделения) с указанием характеристик и критериев их достижения;
- сбор и структурирование информации о сферах неопределенности, моделях и источниках информации;
- идентификация и классификация факторов риска, регистрация произошедших риск-событий;
- настройка методики оценки факторов риска (шкалы/вербальные шкалы, объекты/базовый набор факторов, критерии и субъекты/эксперты экспертной оценки);
- построение профиля риска на основе проведенных экспертных оценок факторов риска;
- формирование отчетов о текущем состоянии и динамике изменения уровня риска (в раз- деле целей и подразделений предприятия);

– анализ причинно-следственных связей проявления факторов риска («цепочки НРС» – нежелательного развития событий);

– воздействие на уровень риска через программу антирисковых мероприятий;

– оценка эффективности работы системы управления рисками, учитывающая возможные потери при проявлении факторов риска, затраты и эффект антирисковых мероприятий.

Важно, что согласно заявлению разработчика, текущая версия автоматизированной системы управления рисками функционирует на платформе «1С» 8-й версии.

Известно, что «1С» является самой распространенной программой бухгалтерского и управленческого учета на отечественном рынке. В соответствии с информацией, полученной в сентябре 2018 г. у официального дистрибьютора «1С» в Республике Беларусь компании «Ми-Софт», никаких самостоятельных разработок в области автоматизации систем управления рисками специалистами «1С» не ведется. Однако, проанализировав программу «1С:ERP Управление предприятием 2» для Беларуси, мы можем сделать вывод, что программа учитывает многие показатели, традиционно необходимые для управления рисками, в разных блоках: «Мониторинг и анализ показателей деятельности» (возможность создания различных вариантов показателей и их сравнения), «Бюджетирование» (возможность моделирования сценариев и экономического прогноза), «Управление закупками» (возможность подбора оптимальных поставщиков товара по их надежности) и т. п.

Еще один программный продукт, имеющий русскоязычную версию и заслуживающий отдельного внимания – @Risk (разработка компании PALISADE, мирового лидера в области программного обеспечения для анализа рисков и принятия решений).

Эта разработка совместима со стандартной программой Excel и позволяет анализировать риски с использованием моделирования по методу Монте-Карло. В результате заказчик получает максимально возможное количество сценариев и связанные с ними результаты в модели на базе

электронной таблицы, с определением вероятности каждого результата и связанных с ним рисков.

По заявлению разработчиков (и на основании положительных отзывов пользователей) данная программа позволяет планировать наилучшие стратегии управления рисками. «Это возможно благодаря интеграции модуля RiskOptimizer, который объединяет моделирование по методу Монте-Карло с последними технологиями поиска решений для оптимизации любых электронных таблиц с неопределенными значениями. Используя генетические алгоритмы или механизм OptQuest вместе с функциями @RISK, модуль RiskOptimizer помогает определить лучшее распределение ресурсов, оптимальное распределение активов, самое эффективное расписание и многое другое». Программа позволяет также анализировать новые продукты и их жизненный цикл, помогает в ценообразовании и определении эффективности капиталовложений.

Сложно прогнозировать дальнейшее развитие автоматизации управления рисками на отечественном рынке. Учитывая общую мировую тенденцию к компьютеризации и автоматизации, можно предположить, что российские и белорусские разработчики будут отслеживать интерес к подобной продукции в нашей стране и адекватно реагировать на потребности отечественных предприятий. Однако опасно и переоценивать эффективность подобных программ. Они могут заменить человека в отношении сложнейших расчетов, моделирования, рутинных операций, но не продемонстрируют качества, присущие только человеку – интуицию, разум, проницательность и удачливость.

И, безусловно, совершенно неправильно начинать управление рисками с выбора программного обеспечения. Для начала нужно разработать методологию, все пройти «вручную» и только после этого перейти к выбору программного продукта.

#### Литература

1. Электронный источник. Доступно на [http://www.krissgroup.ru/solutions/kgrisk\\_soft.php](http://www.krissgroup.ru/solutions/kgrisk_soft.php)

2. Электронный источник. Доступно на <http://www.palisade.com/risk/ru/>

УДК 338.5

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНОВОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Гайдус Е.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Ценовая политика – исключительно важный инструмент предприятия – товаропроизводителя, однако его использование сопряжено с риском, поскольку при неумелом обращении с ним могут быть получены самые непредсказуемые и отрицательные по своим экономическим последствиям результаты. И уж совершенно недопустимо

для предприятия отсутствие ценовой политики как таковой.

Ценовая политика – наиболее эффективный инструмент конкурентной борьбы. Гораздо проще изменить цену, чем изменить технологию производства товара, освоить новые каналы сбыта или изменить восприятие потребителей.

Основная цель ценовой политики – максимизировать прибыль при заданном объеме продаж в единицу времени.

Но есть и вторая сторона – это потребители.

В качестве компромисса между производителями и потребителями выступает теория рыночного спроса и предложения. Почему она является таковой? Спрос отражает интересы покупателей. Спрос на какой-либо товар или услугу представляет собой желание и возможность купить определенное количество товаров или услуг по определенной цене в определенный период времени.

Характеристиками спроса являются: объем спроса, отражающий количество товаров или услуг, которое потребители готовы купить по определенной цене в течение определенного периода времени; цена спроса, определяющая максимальный уровень цены, которую покупатель готов заплатить за определенное количество товаров или услуг.

В свою очередь, предложение отображает интересы производителей. Предложение какого-либо товара или услуги отражает готовность производителей продать определенное количество данного товара или услуги по определенной цене в течение определенного периода времени.

Характеристиками предложения являются: объем предложения, отражающий количество товаров или услуг, которое готовы продать продавцы по определенной цене в течение определенного периода времени; цена предложения, определяющая минимальный уровень цены, по которой продавцы согласны продать определенное количество товаров или услуг.

Между продавцами и покупателями достигается компромисс, в результате которого цена устанавливается на равновесном уровне, который устраивает в определенный момент времени обе стороны.

Рассмотрим стратегии ценообразования и управления ценами. Основной задачей стратегии ценообразования в рыночной экономике становится получение максимальной прибыли при запланированном объеме продаж. Ценовая стратегия должна обеспечить долговременное удовлетворение нужд потребителей путем оптимального сочетания внутренней стратегии развития предприятия и параметров внешней среды в рамках долгосрочной маркетинговой стратегии.

Следовательно, при разработке ценовой стратегии каждое предприятие должно определить для себя ее главные цели, как, например, доведение до максимума выручки, цены, объемов реализации продукции или конкурентоспособности при обеспечении определенной рентабельности. Структура ценовой стратегии состоит из стратегии ценообразования и стратегии управления ценами.

Стратегия ценообразования позволяет определить с позиций маркетинга уровень цен и пре-

дельные цены на отдельные группы продукции. Ценообразование всегда следует проводить с учетом номенклатуры и качества продукции, ее полезности, значимости и покупательной способности потребителей и цен конкурентов. В отдельных случаях следует учитывать и цены на продукцию-заменитель.

Стратегия управления ценами есть комплекс мер по поддержанию условных цен при фактическом их регулировании в соответствии с разнообразием и особенностями спроса, конкуренции на рынке.

Основные шаги разработки ценовой стратегии:

1. Анализ цен (включает получение ответов на следующие вопросы): определены ли ценовые нормы; учтена ли характеристика потребителя; обоснована ли дифференциация цен; учтена ли возможная тенденция изменения цен; достаточно ли ценовые нормы увязаны с другими маркетинговыми средствами; позволяют ли они участвовать в конкурентной борьбе; учтена ли гибкость спроса при установлении цены; учтена ли реакция конкурентов на цену данного вида продукции; соответствует ли цена имиджу продукции; учтен ли при установлении цены этап жизненного цикла продукции; правильно ли определены нормы скидок; предусматривается ли дифференциация цен.

2. Установление целей и направлений ценообразования: цели ценообразования – прибыль, выручка, поддержание цен, противодействие конкуренции; направления ценообразования – по уровню цен, регулированию цен, системе скидок.

3. Окончательное принятие решения по ценовой стратегии.

На каждом типе рынков с учетом задач, стоящих перед предприятием и складывающейся конъюнктуры, ценообразованием могут быть решены следующие задачи: обеспечение плановой нормы прибыли, гарантирующей конкурентоспособность и быструю реализацию продукции предприятия. Здесь надо быть достаточно осторожными, так как это может привести к тому, что цена перестанет играть положительную роль в маркетинге; создание денежного запаса: если у предприятия есть проблемы со сбытом продукции, приток денег может быть важнее прибыли. Такое положение характерно сегодня для многих предприятий в отношении «живых» денег. Иногда стоимость имеющихся запасов такова, что их лучше продать по цене, равной или ниже себестоимости, чем хранить на складе в ожидании изменения конъюнктуры рынка. В отдельных случаях удержанием низких цен, когда завоевано твердое положение на рынке, можно сдерживать появление новых конкурентов; обеспечение заданного объема продаж, когда ради удержания долговременной позиции на рынке и увеличения объемов реализации

можно поступиться долей прибыли. Положительной считается ситуация, когда продукция одновременно имеет и качественные преимущества перед продукцией конкурентов. В этом случае после завоевания определенной доли рынка можно со временем и несколько увеличить цены. Крайней формой такой политики является «исключающее» ценообразование, когда цена на продукцию устанавливается настолько низкой, что приводит к уходу с рынка части конкурентов. Завоевание престижа: наиболее эффективный способ в случаях, когда потребитель затрудняется в определении разницы в качестве продукции конкурентов. Престижная цена соответственно должна принадлежать продукции, которая соответствующим образом рекламируется и продвигается на рынок. Полное использование производственных мощностей за счет «непикового» ценообразования. Эффективно там, где сложились высокие «установившиеся» и низкие «меняющиеся» цены, где спрос меняется с определенной периодичностью (например, природные ресурсы, транспорт и др.). Когда спрос низок, вместо того чтобы оставлять незагруженными производственные мощности, не окупая постоянной части стоимости, необходимо стимулировать спрос, оценивая продукцию более высоко, чем переменную составляющую спроса.

Проблема ценообразования занимает ключевое место в системе рыночных отношений. Можно предложить следующие мероприятия, способствующие увеличению сбыта и, как следствие, увеличению выручки и прибыли предприятия.

1. Для повышения эффективности планирования и организации управления предприятия

необходимо разрабатывать ежегодный план маркетинга, где взаимосвязаны по срокам, содержанию, средствам все мероприятия, проводимые в рамках службы маркетинга.

2. Для изучения системы ценностей потребителей и уровня удовлетворения их запросов в предприятии необходимо проводить непрерывное исследование рынка, постоянное выявление предпочтений потребителей, как с позиции устных опросов в местах продажи, по телефону, так и письменного анкетирования по почте.

3. Повышая конкурентоспособность своей продукции, предприятие использует современное оборудование для производства продукции ряд мероприятий для более жесткого контроля за качеством поступающего сырья необходимого для производства продукции.

4. Стабильного уровня прибыли предприятия вне зависимости от того, на какой стадии жизненного цикла находится товар, может добиться, используя различные стратегии ценообразования.

Нельзя не отметить, что финансовая устойчивость предприятия – это экономическая категория, выражающая такую систему экономических отношений, при которых предприятие формирует платежеспособный спрос, способно при сбалансированном привлечении кредита обеспечивать за счет собственных источников активное инвестирование и прирост оборотных средств, создавать финансовые резервы, участвовать в формировании бюджета. Платежеспособность выступает внешним проявлением финансовой устойчивости предприятия и отражает способность хозяйствующего субъекта платить по своим долгам и обязательствам в данный конкретный период времени.

УДК 338.45

## НОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОДУКЦИЙ В КНР - ЧЖЭЦЯНСКИЙ КОММЕРЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Гао Хан

Сиань, КНР

Чжэцзянский коммерческий центр интеллектуальной собственности был создан при активном содействии Департамента науки и техники провинции Чжэцзян и Чжэцзянского университета с целью дальнейшего продвижения процесса коммерциализации научно-технических достижений, стимулирования создания, применения и защиты интеллектуальной собственности посредством установления коммерческой платформы.

Основными направлениями развития Чжэцзянского коммерческого центра интеллектуальной собственности являются сопряжение спроса и предложения, сосредоточение ресурсов, создание необходимых условий, консалтинговая деятельность, внедрение финансовых инноваций и др., в качестве метода сосредоточения ресурсов ком-

мерциализации используется агентская система представления интересов членов организации по их поручению. Благодаря применению современных интеллектуальных данных, технологий финансовых операций и мобильной интернет-коммуникации, с учётом существующих различий в стандартизации интеллектуальной собственности, данным Центром создана единая сеть, охватывающая всю провинцию, распространяющаяся на всю территорию страны и объединяющая Китай с зарубежными странами, а также рыночная система для свободного осуществления сделок в области интеллектуальной собственности, кроме этого, прилагаются усилия для создания рынка распределения научно-технических инновационных ресурсов общегосударственного значения.



1. Создание совершенной системы сопряжения спроса и предложения: Создание системы поставок интеллектуальной собственности; создание каналов получения запросов на внедрение технологий в производство; создание коммерческой сети интеллектуальной собственности в рамках провинции и за её пределами; создание официального сайта Центра; создание аукционных конкурентных брендов интеллектуальной собственности; создание платформы для поддержки и трансферта передовых фундаментальных исследований.

2. Стимулирование полноценной интеграции научно-технических инновационных ресурсов: Создание системы членов организации с механизмом коммерциализации; создание специализированного сайта интеллектуальной собственности под собственной торговой маркой; создание системы определения номинальных биржевых котировок государственных научно-технических достижений и интеллектуальной собственности и системы публичного уведомления; создание системы свидетелей сделки.

3. Предоставление консалтинговых услуг и осуществление специализированных операций: Предоставление услуг по встречным искам в области интеллектуальной собственности; предоставление услуг анализа патентов на инвестиционные проекты.

4. Создание условий для защиты интеллектуальной собственности: Проведение серии тематических мероприятий в области интеллектуальной собственности; осуществление деятельности в области использования торговых марок.

5. Стимулирование финансовых инноваций в области интеллектуальной собственности: Создание новой модели финансирования интеллектуальной собственности; создание платформы для демонстрации и развития средних, малых и мелких научно-технических предприятий; создание системы финансирования научно-технических достижений.

Учреждение Чжэцзянского коммерческого центра интеллектуальной собственности ознаменовало новый этап развития технического рынка. Центр станет важной платформой для ускорения процесса коммерциализации научно-технических достижений, сможет эффективно восполнить слабые места высших учебных заведений и иных источников научно-технических инноваций, будет содействовать согласованному развитию производственной, инновационной и финансовой цепочки, способствовать более эффективному внедрению в производство ещё большего количества лучших научно-технических инновационных решений.

УДК 338

## ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

Гурина Е.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

История свидетельствует, что в долговременном периоде отчетливо проявляется тенденция постоянного роста экономики. Однако в кратковременном (или относительно кратковременном) периоде ее развитие характеризуется волнами подъемов и спадов экономической конъюнктуры, то есть уровней спроса и предложения производства продукции, выполнения каких либо работ, оказания услуг. Закономерности волнообразного характера макроэкономической динамики рассматриваются как проблемы экономического (делового) цикла. Экономический цикл (цикл деловой активности) – это регулярно повторяющиеся периоды в экономическом развитии. В объективно существующих условиях экономической цикличности в развитии и мировой, и национальных экономик периоды взлётов и падений (вплоть до полного исчезновения) наступают неизбежно.

Несмотря на то, что в современных условиях регулярность и продолжительность колебаний и последовательность фаз циклов нарушились, а также изменились их некоторые характеристики и в настоящее время целесообразно рассмат-

ривать классические подходы к структуре этих циклов.

Как известно, **первая важная фаза экономического цикла – кризис (рецессия, сжатие, спад)**. Его характерные черты:

– превышение предложения над спросом, ведущее к накоплению товарных запасов и падению цен;

– кризис сбыта и падение цен ведет к сокращению производства;

– большое число банкротств и крахов;

– массовая безработица;

– падение заработной платы и уровня жизни;

– рост потребности в деньгах для оплаты обязательств (всеобщая погоня за деньгами), который ведет к росту ссудного процента.

**Вторая фаза цикла депрессия** – экономика достигает «дна», низшей точки падения производства:

– сокращение производства и падение цен прекращаются;

– стабилизация товарных запасов;

– снижение ссудного процента (деловая активность очень низка – нет спроса на деньги):

– сохранение безработицы на высоком уровне;

– создание возможности расширения сбыта и возникновение перспектив выхода из кризиса при стабилизации цен.

**Третья фаза** – оживление характеризуется ростом производства, ведущего к восстановлению предкризисного уровня:

– рост цен;

– усиление деловой активности;

– рост спроса на промышленное оборудование (основной капитал),

– в оборот вовлекаются новые капиталы и соответственно спрос на деньги увеличивается, что ведет к повышению ссудного процента.

**Четвертая фаза цикла** – подъем (экспансия, бум):

– объем производства превосходит предкризисный уровень;

– рост цен при общем росте заработной платы;

– безработица достигает минимального уровня;

– за пределами пика рост деловой активности прекращается, возникает проблема сбыта, производство сокращается, экономика вступает в фазу кризиса и т. д.

Одновременно для всех типов экономических систем характерной особенностью является наличие не только центробежных, но и центростремительных процессов, которые обуславливают необходимость обеспечения устойчивого экономического развития, то есть цикл сам создает условия и предпосылки, необходимы для перехода от одной фазы к другой. Поэтому, обеспечение эффективного развития социально-экономических систем, должно основываться на детально обоснованных стратегиях такого развития, которое было бы основано на использовании экономических законов и учитывающее влияние всего спектра внешних и внутренних факторов.

Проанализировав основные методологические подходы к понятию «устойчивое развитие», можно сделать вывод, что под устойчивостью социально-экономической системы понимается её способность стабильно функционировать и развиваться в долгосрочной перспективе в условиях быстро меняющейся внутренней и внешней среды, достигая цели социально-экономического развития. Основным ожидаемым результатом выступает положительная динамика уровня и качества жизни населения на основе сбалансированного воспроизводства социального, хозяйственного, ресурсного и экономического потенциалов. Другими словами целью достижения устойчивого развития является обеспечение экономического подъема с учетом одновременной защиты ресурсов и окружающей среды в интересах живущих и будущих поколений. Большинство учёных и практических работников считает,

что устойчивое развитие предполагает положительную динамику изменения важнейших взаимосвязанных индикаторов (населения, хозяйства, природы), отражающих стабильное функционирование и сбалансированное поступательное движение социальной, экономической и экологической сфер деятельности человека. Поэтому при разработке стратегий устойчивого экономического роста следует акцентировать внимание на следующих положениях.

1. Развитие экономики на макроэкономическом уровне основывается на необходимости роста национального дохода, основанного на обеспечении оптимального уровня капитала, при установлении оптимальных пропорций между различными его видами, определении меры взаимозамещаемости этих видов и методов оценки их стоимости.

2. Социальная составляющая устойчивости развития должна быть ориентирована на человека и направлена на сохранение стабильности социальной и культурной системы, в том числе, на сокращение числа разрушительных конфликтов. Она характеризуется сохранением физического и интеллектуального капитала, а также более полным использованием практики устойчивого развития, имеющейся в не доминирующих культурах.

3. С экологической точки зрения, устойчивое развитие должно обеспечивать целостность биологических и физических систем, при этом необходимо учитывать:

а) для возобновляемых природных ресурсов (земля, лес и пр.) их количество или возможность продуцировать биомассу, которые должны, по крайней мере, не уменьшаться в течение времени, т. е. обеспечение режима простого воспроизводства;

б) для невозобновляемых природных ресурсов – максимально возможное замедление темпов истощения их запасов с перспективой замены в будущем на другие нелимитированные виды ресурсов. Страна с экономикой, значительно зависимой от невозобновляемых ресурсов, должна реинвестировать ренту от эксплуатации этих ресурсов для того, чтобы добиться сохранения постоянного реального потребления во времени, а не использовать ренту только для потребления;

в) для отходов должна быть предусмотрена возможность минимизации их количества на основе внедрения малоотходных, ресурсосберегающих технологий и технологий утилизации;

г) для минимизации загрязнения окружающей среды в перспективе должна быть предусмотрена возможность достижения его уровня до социально и экономически приемлемого.

Как показывает исторический опыт, к условиям и предпосылкам, необходимым для перехода от одной фазы экономических циклов к другой,

которые обуславливаются самим циклом, можно отнести научно-техническое развитие в целом и инновационную деятельность в частности.

Многие экономисты определили, что перед и в начале подъема волны каждого большого цикла возникают глубокие изменения в экономической жизни общества, которые проявляются в значительных изменениях техники, производства, возникновении новых рынков сбыта. Причины экономических циклов видятся в разнообразных обстоятельствах: периодичности обновления основного капитала и инвестиционного процесса; нарушении законов денежного обращения; неравномерности накопления капитала; недопотреблении трудовых ресурсов; даже в положительных демографических тенденциях.

При этом, траекторию равновесия экономического роста определяют два основных показателя: скорость обновления производственных фондов и эффективность нововведений. Мировой опыт подтверждает, что *длительное развитие в долгосрочном периоде зависит не столько от ресурсных возможностей, сколько от инновационного характера производства в конкретной среде*. Всё это обуславливает ситуацию, при которой фазы «упадка» экономической

волны характеризуются активизацией инновационной деятельности, оживлением в создании новых рабочих мест, новых отраслей производства, изменением технологической парадигмы, что в конечном итоге приводит к преодолению кризиса.

Инновационные процессы связываются с различными факторами конъюнктуры – с равновесием «первого порядка» – спросом и предложением; «второго порядка» – переливанием капитала в новое оборудование, машины, модернизацию производства; «третьего порядка» – изменением производственной структуры, сырьевой базы, источников энергии, квалификации и условий труда рабочих и т. д. К тому же, учитывая, что цикличность характерна и для инновационных процессов, регулирование факторов, влияющих на устойчивое экономическое развитие возможно лишь при учёте специфики инновационной деятельности и её результатов на всех фазах этого цикла: фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских разработок, организации подготовки производства и освоения (внедрения) инноваций, их непосредственного производства, сбыта, продажи, эксплуатации и утилизации.

УДК 330.322

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Гурко А.И.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Проблема представляет собой конкретную ситуацию, в которой есть два состояния: существующее и желаемое (предполагаемое, эталонное, допустимое). Когда создаются условия, порождающие проблему, возникает *проблемная ситуация* как разрыв в деятельности, рассогласование между целями и возможностями экономического объекта. Проблема характеризуется различием между существующим выходом  $\{Y_j\}$  и необходимым выходом  $\{Y_j^*\}$  экономического объекта.

Рассмотрим суть проблемы экономического объекта с системных позиций. Для этого обратимся к обобщенной схеме экономического объекта и его структурной схеме (см. *рис.1* и *рис.2*).

Входные внешние воздействия экономического объекта можно разделить, например, на четыре вида:

$X_1$  – информационные и управляющие воздействия верхнего уровня;

$X_2$  – горизонтальные информационные связи, используемые для выработки управляющих воздействий на объект;

$X_3, X_4, X_5$  – исходные ресурсы, используемые в процессе функционирования экономического объекта;

$X_6$  – неуправляемые факторы, называемые возмущениями, нарушающие нормальный процесс функционирования объекта.

Соответственно можно выделить выходы экономического объекта:

$Y_1$  – выходная информация, обратная связь с управляющим органом высшего уровня;

$Y_2$  – горизонтальные информационные связи;

$Y_3, Y_4$  – целевые конечные результаты функционирования экономического объекта;

$Y_5$  – негативные последствия функционирования объекта.

Если анализируемую проблему представить с помощью *Рис. 1*, тогда входы  $\{X_i\}$  следует рассматривать как исходные условия и ресурсы, порождающие проблему, а выходы  $\{Y_j\}$  – как результаты функционирования экономического объекта, обеспечивающие определенную степень достижения поставленной цели.

То, что на *Рис. 2* является экономическими объектами низшего уровня (элементами, помеченными цифрами 1-6), теперь будем рассматривать как подпроблемы, которые в процессе решения проблемы взаимосвязаны общностью выделенных ресурсов и принципом единства целей. В

данных условиях этот принцип означает, что решение каждой из подпроблем должно быть подчинено наилучшему решению проблемы в целом.

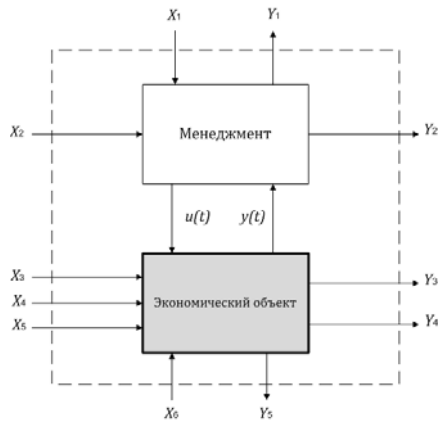


Рисунок 1 – Обобщенная схема экономического объекта

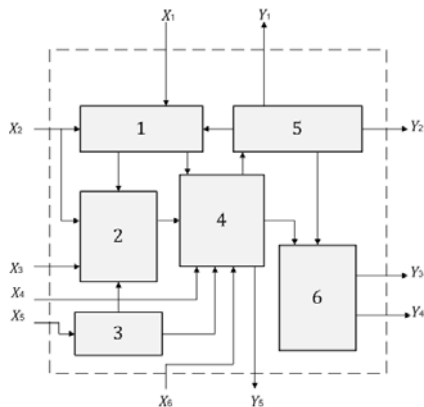


Рисунок 2 – Структурная схема экономического объекта

Тот факт, что решение проблем направлено на стабилизацию функционирования или на совершенствование экономических объектов, имеющих иерархическую структуру, обуславливает иерархичность и самих проблем. Проявляется она не только в том, что каждая проблема представляет собой совокупность подпроблем, но и в том, что почти каждая проблема может рассматриваться, как часть (подпроблема) более крупной проблемы.

Этап структуризации проблемы заключается в выявлении подпроблем разных уровней, их взаимных связей в соответствии с сущностью системного подхода. Последовательную детализацию подпроблем, как общих направлений действия, можно продолжать до тех пор, пока дальнейшая их конкретизация будет означать переход к определенному мероприятию, действию, реализующему решение соответствующих подпроблем младшего уровня. Этап заканчивается выявлением отдельных подпроблем и их взаимных связей.

Исследование проблемы любой сложности начинается с разработки структуры ее решения в виде цикла «начало – окончание». Мегацикл, когда «начало» – это фундаментальные исследования, а окончание – это внедрение. По аналогии

разрабатывается и схема действий по исследованию проблемы.

Проблема  $P$  для ее исследования разбивается на ряд задач  $\{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}\}$ , достаточных для нахождения решения и реализации полученных результатов в практическую деятельность. В свою очередь, задачи в зависимости от их назначения группируются в этапы. Из этапов и задач образуется цикл исследования (разработки) проблемы.

Под *циклом* будем понимать определенную последовательность этапов и задач, начиная от выяснения диагностических признаков проблемы до формирования модели «будущего» состояния и его реализации.

Цикл исследования проблемы зависит от выбранного подхода к формированию механизма ее разработки и класса проблемы.

Цикл исследования «стандартных», хорошо структурированных проблем назовем *классическим*. Он может встраиваться в исследования «сложных» и «сверхсложных» проблем.

Сложные, слабо структурированные проблемы, требующие поиска путей развития системы, ставят перед менеджерами сложные вопросы:

- постановка проблемы и ее структурирование;
- разработка альтернатив;
- выбор методов решения;
- оценка надежности полученных решений.

В качестве основы исследования предлагается модель цикла решения проблем, представленная на *Рис.3*.

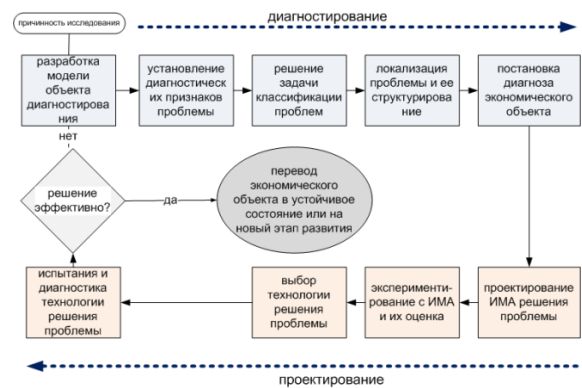


Рисунок 3 – Модель цикла исследования и решения проблемы

Отличительная особенность данной модели состоит в следующем:

- работа над проблемой ведется в интерактивном режиме с возможностью неоднократного пересмотра решений на этапах, в ходе которых перепроверяются и корректируются промежуточные результаты;
- решение проблемы рассматривается как итерационный процесс, позволяющий не только проектировать и сравнивать варианты решения проблемы, но и оценивать различные ее постановки и разработанные стратегии.

Вводом *диагностики* в качестве *первой стадии* цикла делается акцент:

– на неопределенность и неоднозначность оценки сложившейся бизнес-ситуации в экономическом объекте;

– на необходимость выбора из «беспорядка» проблем наиболее актуальной на данный период времени.

Для того чтобы понять образуемый круг проблем, потребуется:

– сформировать модель исследуемой системы (объекта диагностирования);

– установить диагностические признаки проблем и выявить их природу;

– классифицировать исследуемые проблемы выявить закономерности их проявления, противоречия, возникающие в управлении;

– установить диагноз экономического объекта.

Диагностика завершается ранжированием проблем и, в соответствии с его результатами, постановкой и структурированием проблемы, принятой для разработки.

На *второй стадии* исследования проблемы, выстраивается «будущее состояние» экономического объекта, с проектированием исходного

множества альтернатив (ИМА). По каждому варианту решения проблемы ведется системная проработка, он рассматривается как проект, включая и экономическую оценку. Возможности каждой альтернативы решения проблемы устанавливаются экспериментальным путем, как правило, математическим или имитационным моделированием. Результатом стадии «проектирование» является обоснование выбора системной технологии вмешательства [1] в функционирование экономического объекта и переход к разработке плана ее внедрения. *Внедрению* предшествует этап *тестирования*, на котором подтверждается эффективность найденного решения.

На третьей стадии исследования проблем предполагается вмешательство в технологию управления для перевода экономического объекта в состояние устойчивого функционирования или на новую стадию развития.

### Литература

1. Мейби К., Девис П., Холлова Д. Системная технология изменения: Управление развитием и изменением, BZR751 / Пер. с англ. Кн. 9. – Жуковский: МИМ ЛИНК, 1998.

УДК 657

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА НА МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ФИНАНСОВОЙ ОТЧЕТНОСТИ

Козленкова О.В.<sup>1</sup>, Овсяник Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Академия финансов и бизнеса, Варшава, Республика Польша

Переход на Международную систему финансовой отчетности (МСФО) является техническим завершением долгой работы над освоением международных стандартов финансовой отчетности.

План по переходу белорусских субъектов хозяйствования к международной практике отчетности был принят давно, а внедрение в МСФО с календарной привязкой прописано в Законе Республики Беларусь «О бухгалтерском учете и отчетности. Согласно ст. 17 закона, общественно значимые организации (за исключением банков) обязаны составлять за 2016 год и последующие годы годовую консолидированную отчетность в соответствии с МСФО в официальной денежной единице Беларуси. Банки с этого же времени обязаны составлять в соответствии с МСФО годовую консолидированную или индивидуальную отчетность, тоже в белорусских рублях.

Сложности при переходе на новые стандарты могут возникнуть только у тех предприятий, которые вовремя не выяснили, что приобрели статус значимой компании и должны сделать отчетность. Тем более что отчетность им надо будет предоставить, как минимум, с 2-летней ретроспективой.

Открытого списка общественно значимых организаций, которые подпадают под требование о МСФО, не существует. Однако можно предположить, что, кроме банков и страховщиков, в него попадут крупнейшие налогоплательщики страны – предприятия нефтеперерабатывающей, калийной отрасли и т. д. Закон о бухгалтерском учете определяет общественно значимые организации как «открытые акционерные общества, являющиеся учредителями унитарных предприятий и (или) основными хозяйственными обществами по отношению к дочерним хозяйственным обществам, банки и небанковские кредитно-финансовые организации, страховые организации».

Международные стандарты финансовой отчетности позволяют более прозрачно отражать положение дел на предприятиях, чем национальные стандарты.

Национальные стандарты порой дают запоздалую картину либо несправедливую оценку, так как они по-другому учитывают амортизационные фонды и основные средства, Белорусская отчетность не содержит пунктов корпоративной социальной ответственности, она обходит стороной оценку перспектив и рисков предприятия.

А международные стандарты в обязательном порядке требуют описания рисков, с которыми предприятие столкнется в ближайшее время. И того потенциала, который позволит их преодолеть.

Отчетность по МСФО является понятной инвесторам во многих странах мира и составление и размещение на официальных сайтах такой отчетности является «хорошим тоном» в отношениях с потенциальными инвесторами. МСФО облегчит понимание финансовых результатов наших компаний пользователями, включая иностранных пользователей и инвесторов.

Очевидно, что внедрение МСФО потребует от компаний определенных затрат, в том числе временных, однако выгоды от этого на практике окажутся выше, так как руководство и собственники предприятий будут видеть более реальную картину состояния бизнеса, отчетность будет сопоставима с отчетностями других компаний отрасли, в том числе зарубежных.

С внедрением и применением МСФО Беларусь интегрируется в международное бизнес-сообщество, в международные рынки капитала и рынки долговых заимствований. Это знаковый шаг для инвесторов. Корпоративный государственный сектор станет на порядок прозрачнее как для правительства, регуляторов, так и для акционеров, инвесторов и кредиторов. А это будет способствовать дальнейшему планомерному реформированию госсектора.

В сущности, МСФО дает более реалистичную, сопоставимую и прозрачную картину финансового положения и финансового результата (прибыль/убыток) за истекший отчетный период, нежели национальная система отчетности. МСФО предполагает подготовку отчетности на консолидированной основе, с учетом эффекта обесценения активов и гиперинфляционного влияния в экономике на стоимость активов и капитала предприятия, когда инфляция превышает 100 %.

В то же время, при переходе на международные стандарты величина балансовой прибыли может оказаться значительно ниже, чем по правилам белорусского учета.

Ожидается, что изменятся правила листинга на Белорусской фондовой бирже, и предоставле-

ние отчетности по МСФО станет обязательным для публичной компании-эмитента.

Предприятия, и в первую очередь, ОАО, у которых есть дочерние организации или предприятия, смогут использовать свою отчетность по существу для широкого круга инвесторов, самостоятельно выходя на IPO или рынок «евробондов».

По оценкам отечественного бизнес-сообщества, помимо банков и страховых компаний, отчетность по международным стандартам будут обязаны готовить около 1500 ОАО, у которых есть дочерние структуры. Из них только топ-50 ОАО, а это менее 1 %, имеют отчетность по МСФО. От остальных переход на МСФО потребует дополнительных средств на оплату услуг консультантов, модернизацию программного обеспечения, сбор информации, организацию внутреннего контроля.

В целом можно отметить, что главное отличие МСФО от белорусской системы бухгалтерского учета – это понятие субъективного суждения бухгалтера.

МСФО устанавливают общие принципы формирования показателей финансовой отчетности, которые служат основой формирования бухгалтерского суждения. Однако это требует высокой квалификации бухгалтера, которая подразумевает знание не только собственно правил бухучета, но и ряда смежных дисциплин.

При этом большинство нынешних бухгалтеров начинали работать в системе, которая отводила им роль лишь исполнителей законов и инструкций. Требование к бухгалтеру выразить собственное суждение, являющееся основанием для отражения операции в бухгалтерском учете – абсолютно новое явление для национальной системы бухгалтерского учета и новая функция для бухгалтера.

Следовательно, необходимо будет провести громадную работу по обучению практикующих бухгалтеров международным правилам и нормам, а также разработать основной пакет нормативных документов по переходу на международные стандарты учета и отчетности. При этом необходимо не забывать о срочности проведения этих мероприятий.

УДК 336

## ПЕРЕХОД РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ К ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

Лукьяненко А.Ю., Мелюшин П.В., Гурина Е.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В 2016 году в Республике Беларусь вступила в силу программа развития цифровой экономики и информационного общества, охватывающая 2016-2020 годы. 28 марта 2018 года она была подкреплена Декретом № 8 о развитии цифровой экономики. Политическое же решение об этом

было принято раньше – в 2005 году, однако даже это в сравнении с мировыми тенденциями поздно. Сам «цифровая экономика» появился на 10 лет раньше – в 1995 году у канадского профессора менеджмента Дона Топскотта и американского информатика Николаса Негропonte.

Краткое толкование цифровой экономики – экономика, базирующаяся на цифровых компьютерных технологиях, но не ограничивающаяся только лишь их внедрением, а коренным образом преобразующая сферы и бизнес-процессы на базе интернета и новых цифровых технологий. Эта идея постепенно входила в политическую повестку государств начиная с 1995 года и к 2015 году страны G20 приняли итоговый документ по развитию и сотрудничеству в сфере цифровой экономики. В 2016 году общие цели определили и зафиксировали страны Организации экономического сотрудничества и развития и затем обсудили единые подходы к регулированию цифровой экономики в 2017 году.

В результате сектор цифровой экономики сейчас является движущей силой инноваций в мире – на него приходится большая доля расходов на НИОКР и более трети всех патентных заявок.

Для Республики Беларусь цифровая трансформация экономики – шанс её переориентировать, обеспечив ей долгосрочный и устойчивый рост. Первой преградой на этом пути является упомянутое ранее отставание Республики Беларусь от мировых лидеров цифровой экономики, составляющее 3-4 года. И была создана упомянутая ранее программа, закрепленная затем Декретом № 8. Значительное влияние на них оказал пример азиатской цифровой трансформации, в котором белорусские ученые видят большой потенциал. Документ предусматривает упрощение порядка заключения внешнеэкономических сделок с использованием интернета – возможность заключения их в электронном виде. Документ был разработан в соответствии с поручением главы государства администрацией Парка высоких технологий (ПВТ) совместно с резидентами ПВТ, ИТ-сообществом, ведущими юридическими и консалтинговыми фирмами Беларуси, а также зарубежными экспертами. Декрет №8 продлил действие специального налогово-правового режима Парка высоких технологий до 2049 года. Сохранен экстерриториальный принцип регистрации, также остались неизменными базовые условия хозяйствования для резидентов ПВТ. После принятия декрета о развитии цифровой экономики в 2018 году отмечен рекордный рост желающих вступить в Парк высоких технологий. Так, за первый квартал число компаний – резидентов парка увеличилось на четверть. За более чем 10-летнюю историю ПВТ такой существенный одномоментный прирост – с 192 до 238 резидентов, то есть сразу на четверть, – произошел впервые. Сфера их технологической компетенции – это, в первую очередь, искусственный интеллект, машинное обучение, Интернет вещей, технологии дополненной реальности.

Таким образом программа по развитию цифровой экономики в Республике Беларусь и Декрет №8 способствуют более плотной интеграции экономики страны в мировую. При этом Республика Беларусь не теряет от этого независимости на мировой арене, а лишь наоборот – укрепляет свои позиции и упрощает взаимоотношения с другими участниками мировой экономики. Если суммировать, сегодня цифровая экономика позволяет сократить транзакционные издержки, повысила прозрачность рынков, усиливает конкуренцию, снижает барьеры выхода на рынок, усиливает глобальный характер экономики. Сопутствующий эффект – стремительный рост числа телеработников, которые снижают издержки на офисы и увеличивают производительность труда на 20–40 % за счет экономии времени на дорогу, что, помимо прочего, экономит горючее.

Цифровая экономика – это шанс для переходных и небольших государств, и многие из них, им уже воспользовались, разместив у себя элементы производственных цепочек транснациональных компаний. Беларусь, которая находится на пересечении товарных, транспортных и оптоволоконных линий, соединяющих ЕС с ЕАЭС и Азией, пока в полном объеме этот шанс не использует. Строящийся Индустриальный парк «Великий камень», возможно, подвигнет белорусскую промышленность к более активной участию в цифровой экономике.

Цифровая экономика не ограничивается лишь макроуровнем, иначе она была бы бесполезна с практической точки зрения и была бы лишь инструментом для обогащения отдельных участников. Однако, возникает вопрос о том, что именно программа по развитию цифровой экономики в Республике Беларусь несет простым людям. Парк высоких технологий, электронные торги, информационная система на предприятии, криптовалюты – это элементы, которые необходимы небольшому проценту людей. Парк высоких технологий – это лишь техно-логический элемент развития страны, которая уже имеет сформированную ИТ-отрасль. Потому программа развития цифровой экономики в Республике Беларусь и Декрет № 8 в немалой степени посвящены превращению ИТ-отрасли Республики Беларусь в нервную систему всех общественных и экономических отношений. Предполагается включение в эту работу всех звеньев: от начальной школы и вузов до министерств и Правительства, где необходимо сформировать структуру, которая бы отвечала за координацию действий госорганов в этом направлении. Чтобы государство было конкурентоспособным, его институты должны развиваться, используя самые современные технологии. Декрет также создает для этого необходимые условия.

До принятия программы резиденты Парка изначально были ориентированы на разработку специфических разработок, то сейчас могут создавать собственные продукты в сфере интернета вещей, медицины, биотехнологий. Это порождает мультипликативный эффект другим отраслям экономики – технологии беспилотного транспорта, 3D-анимации, популярного прикладного программного обеспечения. Технологии дополненной реальности значительно облегчают хирургу проведение микроопераций. Кроме того, IT-отрасль становится проводником новых бизнес-моделей.

Особенно актуальной становится реализация модели «образование через всю жизнь». Это требует стимулирования необходимых изменений, как в системе основного, так и дополнительного образования. Квалифицированный труд требует нестандартного мышления, которое позволяет решать сложные задачи в условиях ограниченности времени, неопределенности и высокой динамики изменения внешних условий. Поэтому социальным вопросом в программе развития цифровой экономики в Республике Беларусь посвящено больше половины содержания. С ним и с результатами исполнения данной программы каждый может ознакомиться на сайте Министерства связи и информатизации Республики Беларусь, что тоже способствует открытости и прозрачности.

Остаются лишь проблемы микро уровня, которые сложно рассмотреть в вышеописанных документах. К этим проблемам относятся – информационная грамотность простых людей, выбор программного обеспечения субъектами хозяйствования, разработка собственного эффективного программного обеспечения, популярного среди простых работников. Лучшим способом решить эти проблемы может стать разработка небольших групп ученых или

небольшие организации. Для эффективного движения в этом направлении необходимо ставить достижимые цели и создавать простые реализуемые на практике решения. Многие решения лежат на поверхности, пример некоторых из них:

- создание системы, помогающей подобрать прикладное программное обеспечение (графические редакторы, офисные пакеты, системы управления базами данных и другие);
- изучение потенциала открытого и свободного программного обеспечения и сотрудничество с соответствующими организациями;
- создание простых в использовании программных и электронных инструментов.

Это станет дополнением к уже существующей программе и повысит ее пользу для обычных людей.

Таким образом можно подвести итог, что Республика Беларусь успешно движется к цифровой экономике. В отличие от более ранних попыток сделать экономику более наукоемкой, сейчас процесс более приближен ко всем людям, а не лишь к отдельным группам. Всё еще остаются отдельные недоработки, особенно на микроуровне, но их преодоление – естественный этап развития.

#### Литература

1. Электронная библиотека БГУ – Цифровая экономика – шанс для Беларуси / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/194207> – Дата доступа: 15.09.2018
2. Сайт Министерства связи и информатизации Республики Беларусь – Государственная программа развития цифровой экономики и информационного общества / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mpt.gov.by/ru/gosudarstvennaya-programma-razvitiya-cifrovoy-ekonomiki-i-informacionnogo-obshchestva>.

УДК 336

### ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СУБЪЕКТОМ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Лукьяненко А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Экономика на современном этапе характеризуется активным использованием программного обеспечения (ПО) и электронновычислительных машин субъектами хозяйствования. Объем данных и сложность вычислений, с которыми ведется работа, таковы, что человеческого ресурса недостаточно для их обработки с необходимыми в условиях конкуренции скоростью и точностью. Конкуренция между субъектами хозяйствования ведет к тому, что требования к качеству и скорости выполнения

операций растут, а вместе с ними растут и требования к программному обеспечению и компьютерам. Без правильного выбора, модернизации и замены этих инструментов субъект хозяйствования приходит к тому, что неэффективной становится также работа специалистов, поскольку профессиональных навыков и человеческих возможностей недостаточно, чтобы компенсировать недостатки устаревших или неоптимально подобранных инструментов подобного рода.



Для решения возникающих проблем, субъекты хозяйствования, встающие на путь информатизации операций, как правило, руководствуются одной из нескольких основных стратегий:

- использование нелицензионного ПО;
- лицензионное ПО, развиваемое собственными силами;
- лицензионное ПО, приобретаемое по принципу известности;
- лицензионное ПО, приобретаемое по принципу наименьшей стоимости;
- лицензионное ПО, приобретаемое обдуманно с учетом анализа ситуации и предыдущего опыта.

Каждая из стратегий выбора программного обеспечения имеет свои недостатки и преимущества, не всегда очевидные. Небольшим субъектам хозяйствования может быть достаточно второй, третьей или четвертой стратегии из представленного списка, средним – стратегий номер два, четыре и пять, а крупным – пятой стратегией. Данные стратегии не являются идеальными:

- использование нелицензионного ПО является нарушением закона со всеми вытекающими последствиями;
- развитие ПО своими силами требует значительных затрат времени и ресурсов, может быть слишком медленным и консервативным;
- приобретение ПО по принципу известности ненадежно, поскольку излишний приоритет отдается внешнему мнению, которое не всегда квалифицировано и в полной мере соответствует запросам самого субъекта хозяйствования;
- выбор ПО по принципу дешевизны порождает риски, связанные с качеством продукта и информационной безопасностью;
- выбор ПО с учетом анализа ситуации и предыдущего опыта, в отличие от третьей стратегии, слишком сильно опирается на прошлое и на мнение самого субъекта хозяйствования, который может быть некомпетентен в данном вопросе.

Проблема анализа результатов применения этих стратегий заключается также и в том, итоги их реализации слабо поддаются унифицированному количественному выражению, что затрудняет оценку результатов. Из-за сложности количественной оценки влияния различных стратегий выбора программного обеспечения на итоговый результат работы субъекта хозяйствования возникает серьезная проблема в применении методов моделирования, особенно математического, которая усугубляется дополнительно тем, что под каждый класс задач существует множество различных программ, обладающих своими особенностями.

В сложившейся ситуации необходимо сделать предварительный шаг, который позволит проанализировать возможности и потенциал

выбираемых программ без необходимости глубокой обработки и формализации данных, одновременно учитывая требования субъекта хозяйствования, отсеивая таким образом неподходящие варианты, поэтому необходимо построить систему отсеивания лишних данных. В условиях смешанных качественных и количественных данных с этой задачей может быть решена с помощью двухуровневого опроса.

На первом уровне вопросы общие и строятся по принципу: с какими документами ведется работа (текстовые, графические, аудио, видео, чертежи, математические модели и другие типы); используемая программа; сложность выполняемых работ, что достаточно, чтобы специальный алгоритм квалифицированный в сфере информационных технологий специалист мог определить проблемные рабочие места и даже обобщенно описать предполагаемые проблемы. Этот этап прост для прохождения любым работником и отсеивает места, где все оптимально. Таким образом также собирается статистика, на основе которой можно в случае необходимости вернуть часть отсеянных результатов, если для анализа необходимо учесть дополнительные факторы – влияние монополии производителя ПО, лицензионные риски, информационную безопасность и другое.

На втором уровне опрос состоит из большего числа пунктов и ставит целью предложить решение. Вопросы более ориентированы на сферу деятельности рабочего места – конкретные форматы файлов, рабочие ситуации, рабочая среда, использование функций программы и другое. Для полноценной работы необходимо следующее:

- база данных функциональных возможностей различных программных продуктов, где эти данные унифицированы;
- гибкий алгоритм, сопоставляющий ответы пользователя с базой, использующий переменные и формулы.

После этого этапа получается список проблемных рабочих мест и предложения по замене программных продуктов для каждого из них, с указанием характеристик, где был получен выигрыш – скорость работы, цена, риски, функциональность и другое.

Интерактивная схема позволяет провести опрос массово и собрать статистику по различным подразделениям и рабочим местам, если это необходимо. Обладая такими данными появляется возможность построить схему интеграции программ в единую информационную систему субъекта хозяйствования, смоделировать потоки данных.

У моделирования в виде логической схемы есть и свои потенциальные недостатки:

- исходные данные необходимо собрать, для чего специалистам, составляющим алго-

ритмы, необходимо испытать несколько разных программ на практике;

- человеческий фактор, из-за которого есть вероятность, что программа просто не попадет в модель;
- невключение актуальных для конечного пользователя вопросов;
- необходимость в наличии организации или группы людей, поддерживающей алгоритм и опрос в актуальном состоянии.

Указанные проблемы поддаются решению так как:

- исходные данные по одной группе программ, как, например, офисные пакеты, под силу собрать и скомпоновать группе из 4-5 человек за неделю;
- включение необходимых программ и актуальных вопросов в список решается за счет внимательного подхода к решению задачи;
- поддержка алгоритма в актуальном состоянии обеспечивается проведением необходимых мероприятий по графику и по отдельным категориям, например, раз в пол года или год;
- заниматься созданием и поддержкой подобного алгоритма может государственная или частная небольшая организация, но лучше, если конечный продукт будет выпускаться под открытой или свободной лицензией с целью прозрачности и непредвзятости.

В заключение стоит отметить, что предлагаемое решение по оптимизации и направлению выбора субъектами хозяйствования программного обеспечения для выполнения своих задач благодаря своей простоте в реализации на

практике. Основным источником проблем на данный момент для субъектов хозяйствования является их информационная неграмотность, высокие цены на программное обеспечение и, как следствие, его пиратство. Дополняется это тем, что у субъектов хозяйствования нет базы данных или автоматизированного помощника, который помог бы сориентироваться и предоставить необходимые рекомендации. Описанный в статье алгоритм может стать основой для такого помощника. Он позволяет конечному пользователю сконцентрироваться на своих задачах. А проблемы незнания многообразия продуктов и их особенностей, в свою очередь, берет на себя алгоритм и группа специалистов в области программного обеспечения, поддерживающих его. При этом специалисты разных областей (программное обеспечение и экономические направления) таким образом не порождают споры, руководствуясь разными подходами к оценке необходимых качеств программного обеспечения, а дополняют друг друга.

#### Литература

1. Электронная библиотека БГУ – Цифровая экономика – шанс для Беларуси / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/194207> – Дата доступа : 15.09.2018
2. LiveLib – ИТ-архитектура. Практическое руководство от А до Я. Вадим Алджанов / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.livelib.ru/book/240654/readpart-itarhitektura-prakticheskoe-rukovodstvo-otadoya-pervoe-izdanie-vadim-aldzhanov>.

УДК 338

### ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ

Ляхевич А.Г.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Облачные технологии подразумевают обеспечение удобного сетевого доступа к общему фонду настраиваемых вычислительных ресурсов (сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам). Ресурсы выделяются и освобождаются автоматически, по запросу пользователей, с минимальными эксплуатационными затратами. Пользователь оплачивает только фактически потребленные ресурсы, без необходимости резервировать ресурсы под «пиковые» нагрузки. Ключевыми моментами здесь является принципы «самообслуживания» (пользователь сам определяет, когда и в каком объеме ему необходимы ресурсы), простоты и гибкости выделения дополнительных ресурсов, а также гарантированной доступности ресурсов из любого места сети. Существуют раз-

личные подходы к модели обслуживания в облаке. Облако может просто предоставлять дисковое пространство под хранение данных (Dropbox, Google Drive, Яндекс Диск и т.п. сервисы); предоставлять гибко настраиваемую инфраструктуру для размещения серверов пользователя (в том числе, в рамках готовых «платформ», настраиваемых пользователем); предоставлять пользователю подписку на использование полностью готового программного обеспечения, обслуживаемого облачным провайдером (например, Office 365, Google Docs и т.п. продукты). Крупнейшими облачными провайдерами являются компании Amazon, Microsoft, Alibaba, Google, IBM. В Республике Беларусь крупнейшим облачным провайдером является СООО «Белорусские облачные технологии» (бренд beCloud), создан-

ный в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь [1]. Деятельность beCloud заключается в проектировании, строительстве, оснащении и эксплуатации опорной сети передачи данных (Единой республиканской сети передачи данных); Республиканского центра обработки данных (РЦОД); единой сети LTE; участка транзитной магистрали сети электросвязи по территории Республики Беларусь. Основным проектом beCloud является создание Республиканской платформы, действующей на основе облачных технологий.

Использование облачных технологий даёт организациям целый ряд существенных экономических преимуществ. По оценкам экспертов, при разработке программного обеспечения до 80 % времени тратится на выполнение рутинных задач непосредственно не связанных с разрабатываемым продуктом (настройка операционной системы и сервисов, резервное копирование данных и т. п.). Облачные технологии позволяют организации перенести решение второстепенных задач на облачного провайдера и сконцентрироваться на ключевых бизнес-процессах, создающих основной доход организации. Использование облачных технологий позволяет снизить время, необходимое на развёртывание IT-инфраструктуры. Используя облако как готовую «платформу» с предустановленным и настроенным программным обеспечением, организация экономит как средства на оплату труда соответствующих специалистов, так и время. В случае же выхода на рынок с новым продуктом, время зачастую является ключевым фактором. При условии сходства потребительских характеристик предлагаемых новшеств, рынок захватит организация предложившая продукт первой.

Облачные технологии также позволяют существенно сократить капиталовложения в IT-инфраструктуру, фактически переведя эти вложения в разряд текущих затрат. Это в значительной степени снимает проблему, связанную с трудностями прогнозирования потребности в оборудовании IT-инфраструктуры. Ведь при ошибке в прогнозе избыточно приобретённое оборудование будет простаивать, увеличивая себестоимость выпускаемой продукции за счёт начисляемых по данному оборудованию амортизационных отчислений. Особенно данная проблема актуальна для инновационных проектов, в которых заранее трудно предсказать степень успешности их реализации и соответственно предполагаемый масштаб реализации проекта. Использование облачных технологий позволяет минимизировать негативное влияние подобных ошибок и создаёт для организации дополнительные конкурентные преимущества за счёт гибкости и простоты масштабирования своей IT-инфраструктуры. Как следствие организация

получает возможность более гибко и оперативно реагировать на любые изменения в процессе реализации проекта и состоянии рынка.

Использование облачных технологий также позволяет снизить стоимость владения IT-инфраструктурой. Помимо устранения возможных проблем с капиталовложениями в простаивающее оборудование, облака снимают и проблемы с вложениями средств в приобретение лицензий на дорогостоящее, но редко используемое программное обеспечение. Используя модель Software as a Service, организация не приобретает дорогостоящую лицензию, а оплачивает только время фактического использования программного продукта. С другой стороны, для производителей программного обеспечения устраняются потери от пиратского использования их продуктов, т. к. пользователь фактически получает интерфейс для взаимодействия с программой, но не получает саму программу в виде исполняемого файла. Именно поэтому производители программного обеспечения всё шире предлагают «облачные версии» своих продуктов. Так фирма 1С предлагает технологию «1С:Фреш», в рамках которой знакомые пользователям программы «1С:Бухгалтерия», «1С:Комплексная автоматизация», «1С:ERP Управление предприятием» и целый ряд других, получили реализацию в виде облачного сервиса.

Облачные технологии также способны обеспечить инфраструктурную поддержку и повышение степени прозрачности и контролируемости экономических процессов. Перенос IT-инфраструктуры организации в облако даёт возможность государственным органам власти более простого и детального контроля за проходящими в организации бизнес-процессами. В общем случае облако могло бы даже представлять аутсорсинговые услуги по ведению такими организациями бухгалтерского учёта, что с одной стороны позволило бы минимизировать возможности уклонения от уплаты налогов, а с другой стороны сняло бы с предприятий (особенно мелких) часть связанных с этим проблем, позволив сконцентрироваться непосредственно на ведении бизнеса. Перенос IT-инфраструктуры государственных организаций в облако позволил бы унифицировать качество предоставляемых ими услуг, обеспечив единый стандарт информационного взаимодействия с ними в рамках облачной структуры, а также снизил бы возможности для реализации коррупционных схем, в силу повышения прозрачности бизнес-процессов в органах государственной власти, совершенствования электронного документооборота, повышения защищённости данных от модификации, уничтожения, несанкционированного доступа. В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь [3] плани-

руется переход государственных органов и иных государственных организаций на республиканскую облачную платформу beCloud. Срок реализации связанных с этим инвестиционных проектов – до 31 декабря 2020 года.

Несмотря на очевидные преимущества, создаваемые для организации использованием облачных технологий, такой подход имеет и целый ряд проблем. Облака замечательно работают для мелких и средних организаций, создающих IT-инфраструктуру «с нуля». В крупных же организациях, зачастую имеется собственная, исторически сложившаяся IT-инфраструктура, и «переезд в облако» представляет собой сложную организационную и техническую задачу. Возникает также вопрос, что делать с уже имеющимся и дорогостоящим оборудованием. Без всякого сомнения, потребуется доработка, настройка и тестирование уже используемого организацией программного обеспечения для функционирования в новой среде, а также переобучение персонала для работы в рамках облачной инфраструктуры, мониторинга и управления её функционированием. Всё это повлечёт дополнительные затраты времени и денежных средств на привлечение соответствующих специалистов. Также не стоит забывать и о вопросах, связанных с безопасностью и стабильностью функционирования облачной инфраструктуры в долгосрочном периоде. Данные, сохраняемые в облачных сервисах, настоятельно рекомендуется предварительно шифровать, для предотвращения утечек коммерческой тайны и иной значимой для организации информации. Также следует помнить, что в долгосрочном периоде организация-

провайдер облачных услуг может изменить политику предоставления услуг, начать испытывать финансовые трудности или вообще поменять владельца. Не исключено также и влияние на «облачный бизнес» политической ситуации, в виде разного рода санкций, да и простого промышленного шпионажа со стороны спецслужб иностранного государства. Учитывая изложенные проблемы, многие организации в настоящее время предпочитают пользоваться услугами облачных провайдеров, находящихся под юрисдикцией собственной страны, и физически имеющие соответствующие центры обработки данных на её территории. Кроме того, возможно использование облачных сервисов в «гибридном режиме», когда основная критическая IT-инфраструктура организации реализуется своими силами, а облака используются только в случае непредвиденных пиковых нагрузок и для функционирования второстепенных по значимости элементов IT-инфраструктуры, не способных нарушить в случае сбоев функционирование важных для клиентов организации бизнес-процессов.

#### Литература

1. Указ Президента Республики Беларусь №556 от 13.12.2012г. «Об условиях реализации инвестиционного проекта в сфере информационно-коммуникационных технологий».
2. Указ Президента Республики Беларусь от 23 января 2014г. № 46 «Об использовании государственными органами и иными государственными организациями телекоммуникационных технологий».

УДК 657.479.30

### РЕКУПЕРАЦИЯ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ ПРЕДПРИЯТИЯ

Козленкова О.В., Мархель К.М., Сычѳв Д.Р.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Рациональное использование природных ресурсов имеет важное значение не только для предотвращения их истощения и загрязнения окружающей среды, но и для снижения затрат на производстве, и как следствие, уменьшения себестоимости.

На сегодняшний день доля материальных затрат составляет примерно 60 % от стоимости промышленной продукции, при этом в структуре издержек производства указанные затраты составляют 85 % от всех затрат. Даже минимальное снижение материальных затрат явно отразится и на национальном доходе: сокращение затрат только на 1 копейку дает прирост национального дохода на несколько миллионов рублей. Экономия материальных ресурсов более эффективна по сравнению с экономией других производственных ресурсов: уменьшение на 1 % материальных

затрат дает экономию, которая в 2,5 раза выше экономии 1 % фонда заработной платы и в 4 раза выше экономии 1 % капитальных вложений [1].

Управление ресурсосбережением включает в себя комплекс природоохранных мер, направленных на бережливое и эффективное использование факторов производства, обеспечивающееся за счет использования современных ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий и эффективной организации производства, выбора рациональных методов изготовления деталей, передовых методов обработки, использования стойких антикоррозионных покрытий, повышения производительности труда, наладки гибкого автоматизированного производства, улучшения конструкции оборудования, использования оперативного технического обслуживания и ремонта, экономии топливно-энергетических ресурсов,

утилизации и использования отходов производства [2].

Одним из способов сокращения потерь природных ресурсов и, как следствие, снижения затрат на производстве, является рекуперация. Рекуперация – это использование тепловой энергии отработанного воздуха, воды и других, чаще всего, промышленных сред для нагрева поступающей жидкости или газа. Наиболее выгодно использование системы рекуперации в промышленности, поскольку в этой отрасли сырье и электроэнергия расходуется тоннами. Только на охлаждение оборудования и продуктов производства затрачивается значительная доля потребляемого на предприятии объема воды. Эта вода циркулирует в системах, многократно нагреваясь и охлаждаясь, и в результате испарения значительная часть безвозвратно теряется. Эти потери компенсируются подачей в систему свежей воды. Таким образом, тепловая энергия бессмысленно и в больших количествах исчезает неиспользованной. Поскольку расходы на энергию в большинстве отраслей промышленности приближаются к 80% от общего бюджета, то ее потеря несет значительные затраты. В качестве наглядного примера разберем компрессор мощностью 15 кВт. При работе в 1000 часов он приведет к экономии 1800–1900 рублей в год за счет рекуперации тепла и сократит выброс углекислого газа на 4-5 тонн. Помимо вышеперечисленных достоинств использования системы рекуперации можно выделить следующие: в условиях такой замкнутой системы охлаждения улучшаются условия эксплуатации компрессора, повышается надежность его работы и благодаря поддержанию в нём постоянной температуры наблюдается увеличение срока эксплуатации [3].

Помимо вышеперечисленных достоинств использования системы рекуперации можно выделить следующие: в условиях такой замкнутой системы охлаждения улучшаются условия эксплуатации компрессора, повышается надежность его работы и благодаря поддержанию в нём постоянной температуры наблюдается увеличение срока эксплуатации. Таким образом, производство могло бы тратить минимум 10 % от потребляемой в настоящий момент тепловой энергии, а в перспективе при выделении её излишков может возникнуть вопрос о её перепродаже, где потребителями могут стать компании-поставщики энергии.

Ведущими в этой области являются страны Западной Европы. Фактически формула обращения с твердыми промышленными и бытовыми отходами в развитых странах воплощает принцип устойчивого развития и может быть кратко представлена следующим перечнем операций: редукция; вторичное использование; переработка; извлечение энергии; захоронение остатков. Полнота осуществления данной формулы в различных странах определяется конкретными экологи-

ческими, сырьевыми, демографическими и другими условиями. В целом европейскими странами принята в настоящее время стратегия, в соответствии с которой возобновляемые источники энергии, к числу которых относятся твердые промышленные и бытовые отходы, должны составлять в их энергобалансе 10-15 % к 2020 году.

В Республике Беларусь сбережение энергии путем рекуперации не так распространено, так как требует определённого вложения денежных средств. Однако можно уверенно сообщить, что внедрение такой системы не повлечет долгосрочных убытков на предприятии и окупит себя за 1-8 лет [4].

Промышленное производство Республики Беларусь относится к высокотехнологичным и энергоёмким отраслям. Наибольший вклад в производство промышленной продукции вносят машиностроительный и металлообрабатывающий комплекс (19,3 %), а также химическая и нефтехимическая промышленность (12 %). В структуре конечного энергопотребления на промышленность приходится до 50 % топливно-энергетических ресурсов, импорт которых составляет до 85 %. Оценка суммарного количества низко потенциальной тепловой энергии, обращающейся на наиболее крупных предприятиях Беларуси, составляет порядка 1200 МВт, что сопоставимо с мощностью одного энергоблока строящейся Белорусской АЭС. Приведенные цифры свидетельствуют об огромном потенциале применения технологий рекуперации низко потенциального тепла, в первую очередь на промышленных производствах. Одним из решений является предлагаемый компрессионный тепловой насос, отличающийся тем, что в нем используется доступное, недорогое и безопасное рабочее тело смесь паров воды и воздуха, в качестве теплообменника-испарителя струйный аппарат, а в качестве компрессора – ротационно-пластинчатый вакуум-насос. При оценке технико-экономических показателей от внедрения рассматриваемого паровоздушного теплового насоса на технологической установке ОАО «НАФТАН» для рекуперации низко потенциального тепла оборотной воды системы охлаждения технологического оборудования установлено, что при его круглогодичном применении срок окупаемости составит ~ 3,7 года.

Наиболее ярким представителем развития рекуперации в Республике Беларусь можно назвать представителей АЗС «Газпромнефть» в Борисове. Применение установки рекуперации паров на нефтебазах позволяет свести к минимуму выбросов углеводородов в атмосферу, а улавливаемые пары возвращаются обратно в виде топлива. Технология улавливания паров нефтепродуктов выглядит следующим образом. При заполнении резервуаров топливом вытесняемые пары посту-

пают в специальные аппараты для поглощения с активированным углем. Пары топлива оседают на поверхности угля, после чего начинается обратный процесс. Воздух из этих емкостей откачивают вакуумными насосами, пары топлива испаряются из пор угля и попадают в абсорбер, где растворяются в бензин, не попадая в атмосферу. Внедрение установки рекуперации на нефтебазе в г. Борисове объясняется экологической необходимостью. Но помимо улучшения экологических показателей и улучшения пожарной безопасности есть и экономический эффект, за счет применения установки в 2015 году более 10 тысяч кг паров углеводородов было возвращено в автомобильный бензин АИ-92 [5].

Рассмотрев вопрос рекуперации, проведя данные об эффективности ее внедрения в производство, ознакомившись с данными о развитии рекуперации в Республике Беларусь и странах Западной Европы мы пришли к выводу, что внедрение рекуперации на производствах приведет к экономии огромных объемов энергии,

принесет дополнительные доходы предприятиям, а также положительно скажется на экологическом состоянии окружающей среды Республики Беларусь.

#### Литература

1. И.Г. Кукукина. Управленческий учет. – М. : Финансы и статистика, 2010. – 400 с
2. В.Г. Лебедев, Т.Г. Дроздова, В.П. Кустарев. Управление затратами на предприятии. – М. : Книга по Требованию, 2012. – 592 с.
3. В.Д. Шкардун. Маркетинговые основы стратегического планирования. Теория, методология, практика. – М. : Дело, 2008. – 384 с..
4. П.П. Кукин, В.Н. Шлыков, Н.Л. Пономарев, Н.И. Сердюк. Анализ и оценка риска производственной деятельности. – М. : Высшая школа, 2007. – 328 с.
5. Рекуперация в Республике Беларусь [электронный ресурс]. URL: <https://www.abw.by/novosti/rb/189126>.

УДК 658

### ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Гурина Е.В., Матюта О.А., Комолов М.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Экономия ресурсов на предприятии – современный способ оптимизации расходов в бизнесе. Для существования и развития предприятия необходимо огромное количество самых разнообразных ресурсов. Самыми дорогостоящими являются: материальные, сырьевые, энергетические ресурсы. Поэтому решение проблем ресурсосбережения в целом и энергоресурсов в частности являются приоритетными для Беларуси, а деятельность предприятий, направленная на ресурсосбережение, осуществляется в соответствии с Национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 года.

Одна из проблем в сфере экономии ресурсов – это проблема роста тарифов. Эксперты говорят об одной и самой главной причине повышения тарифов – несоответствие вносимой оплаты потребителем их реальной стоимости. Другими словами и субъекты хозяйствования и население постоянно оплачивает лишь часть реальной цены ресурса. Так в СССР население оплачивало 3-4 % от реальной стоимости жилищно-коммунальных услуг, а разница в стоимости полностью компенсировалась государством. После развала СССР государство продолжало компенсировать недостачу, но уже в меньших объемах. В настоящее время приводятся данные, что население оплачивает лишь 30 % от реальной стоимости данных услуг

при периодическом повышении тарифов. Для сравнения, в странах Евросоюза конечные потребители всегда оплачивали реальную стоимость полученных энергоресурсов.

Тарифы на энергоресурсы будут продолжать повышаться с каждым годом, никакого удешевления их не предусмотрено, так как большинство из них является не возобновляемыми, а запасы – ограниченными. Однако, есть также и возобновляемые ресурсы, такие как: солнечная энергия, энергия ветра, приливно-отливных волн океанов и морей, тепло недр земли, использование энергоотходов и другие.

По направлению использования различают технологическую, двигательную, осветительную и отопительную энергию. И если взять непосредственно промышленные предприятия, то основными технико-экономическими показателями, характеризующими эффективность организации энергетического хозяйства, являются:

- коэффициенты потерь в сетях по видам энергии;
- эффективность использования энергоустановок;
- абсолютное потребление топлива и других исходных материалов и удельный вес их расхода на выработку единицы определенного вида энергии – электроэнергии, пара, газа, воды, воздуха и так далее;

- себестоимость каждого вида энергии;
- коэффициент энерговооруженности труда и энерговооруженности рабочих.

Основными путями рационализации потребления энергии являются:

- ликвидация прямых потерь топлива и энергии;
- правильный выбор энергоносителей;
- использование вторичных энергоресурсов;
- совершенствование технологии и организации основного производства;
- проведение общехозяйственных мероприятий по экономии топлива и энергии.

Главное здесь – систематический контроль над состоянием сетей, трубопроводов, осуществление профилактических мероприятий в связи с изменением условий их эксплуатации. Поскольку одни и те же процессы могут выполняться с использованием разных энергоносителей, важно разработать сравнительные характеристики этого использования, с тем, чтобы на научной основе осуществлять их выбор для конкретных условий. Выбор этот зависит от ряда параметров: особенностей технологического процесса, источника обеспечения (например, ТЭЦ или собственная котельная) и другие.

Примерами замены одних энергоносителей другими, более экономичными для конкретных условий могут служить замена сжатого воздуха и пара для силовых процессов электричеством, внедрение электронагрева металлов вместо нагрева в печах с использованием твердого и жидкого топлива, замена электроэнергии или мазута на газ при термообработке деталей и так далее.

Рассмотрим основные подходы к использованию основных видов энергоресурсов, оперативное внедрение которых позволит в определённой мере решить проблемы энергосбережения в ближайшее время. К числу основных из них отнести следующие.

1. Экономия тепла. Снижение теплотерь может происходить за счет:

- создания и применения теплосберегающих современных строительных материалов;
- создания и установки качественных окон и дверей с продуманной теплоизоляцией,
- применение разнообразных герметизационных средств с целью устранения утечек тепла производственных и жилых помещений;
- увеличение эффективности систем теплоснабжения за счет модернизации теплогенерирующего оборудования.

В настоящее время всё большее применение приобретает такой метод сохранения тепла как рекуперация энергии. Это метод сбережения тепла с помощью специальных приспособлений, устанавливаемых в кондиционеры и вентиляционные системы. Тепло забирается из отработанного воздуха и передаётся свежему потоку кислорода, что исключает охлаждение помещения в зимний период. Эффективность напрямую зависит от типа рекуперационного устройства: у пластинчатых моделей это показатель в 50 %, у роторного типа от 70 до 90 %. Срок окупаемости один-два года. Цена устройства от 150 долларов США.

2. Экономия воды и газа. Достигается благодаря установке и правильной настройке приборов учета потребления воды, газа. Данные меры приводят к улучшению учета и пониманию в каком именно месте потребления происходит наибольшее и возможно чрезмерное потребление энергоресурсов.

3. Экономия электроэнергии. Самая эффективная первичная мера – это уменьшить потребление электроэнергии, идущее на освещение производственных предприятий. Достигается благодаря минимальным улучшениям:

- прозрачности и площади окон, для осветления помещения;
- для светоотражающих способностей окрашивания стены в светлые цвета;
- использования датчиков освещения;
- использования осветительных приборов только по необходимости, исключительно в рабочее время.

Стоит также отметить, что для уменьшения потери электроэнергии в сети во время передачи применяются кабели и провода с медной жилой. Это обеспечивает их высокую надежность и нагрузочную способность. Особенную актуальность внедрение энергосберегающих технологий приобретает на фоне непрерывного роста стоимости электричества, нефти, газа.

#### Литература

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energylogia.com>.
2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by>.
3. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.energo-pasport.com>.
4. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gosstandart.gov.by>.

УДК 336

**НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**  
**Мелюшин П.В.***Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Современное общество вступило в стадию развития, которая называется информационным обществом, в котором экономика становится информационной. Информация становится определяющим фактором в производстве, финансах и торговле. В работе рассмотрены особенности экономических информационных систем и предложен подход по разработке методологических основ для использования методов экономического моделирования. Проанализированы существующие концептуальные модели и на их основе предложен вариант нейросетевого моделирования. Автоматизация и создание информационных систем являются на данный момент одной из самых исследуемых областей деятельности в экономике.

Одной из причин активного развития данной области является то, что методы экономического моделирования служат основой коренного изменения процессов, играющих важную роль в деятельности человека. Все это породило надежды на то, что с помощью новых научных дисциплин будут разрешены трудные проблемы и противоречия человеческой жизни. Ведется поиск эффективной индустрии разработки большого количества методов экономического моделирования: системы обработки данных, информационные системы управления, маркетинговые системы.

Материальной и технологической базой информационного общества становятся различного рода системы на базе компьютерной техники и компьютерных сетей, информационные технологии, мобильная связь. Активно развивается «Интернет вещей», трафик в котором уже сейчас превышает трафик традиционного Интернета. Доступ к мировым информационным ресурсам, возможности коллективной удалённой работы и обработки огромных массивов данных и информации дают возможность быстрого появления новых знаний и производств, что приводит к пересмотру классические основы традиционных наук и к дальнейшим революционным прорывам в познании природы и самого человека. Потребности финансовой и экономической деятельности в информационном обществе всё в меньшей степени удовлетворяются «законами», «принципами» и моделями «классических» наук, к которым относится и экономические модели в своём теперешнем состоянии. Критика экономических моделей в её теперешнем состоянии, которое остаётся неизменным по крайней мере лет 50, возникла недавно. В остающемся практически всё это время неизменным определении экономических модели констатируется, что это наука, изучающая количественные и качественные эконо-

номические взаимосвязи с помощью математических и статистических методов и моделей.

Определение предмета экономических моделей было выработано в уставе Эконометрического общества, которое главными целями назвало использование статистики и математики для развития экономической теории. Экономические модели обычно рассматриваются как часть экономической теории.

Несмотря на очевидные успехи экономического моделирования в объяснении и предсказании поведения экономических систем и процессов, многие учёные и практики не удовлетворены результатами её применения, и даже считают её бесполезной. Наиболее известные экономисты давно уже критиковали методы экономического моделирования. Так, американский экономист Кейнс пишет: «Экономическая среда изменчива и непредсказуема, а большинство экономических переменных связаны между собой множеством сложных нелинейных зависимостей. Из этого следуют нестабильность коэффициентов корреляции и невозможность решения предсказательных задач. Поэтому экономическая наука не может претендовать на точные количественные измерения. Она должна быть основана на реалистичных предположениях и содержать инструменты, помогающие понять и объяснить эту среду». Ф. Браун утверждал, что «построение регрессий временных рядов годится только для обмана». В. Леонтьев охарактеризовал экономическое моделирование как «попытку компенсировать бросающийся в глаза недостаток имеющихся данных путем широкого использования все более и более изощренных статистических приемов».

Несмотря на критику экономических моделей, например, при попытках предсказать экономические кризисы, её изучение и применение становится в мире всё более масштабным. Экономические модели развивается, добавляются всё новые экономические теории, методы и инструменты из теории систем, теории хаоса, роевого интеллекта, нечёткой логики, гибридных вычислений и др. Особенно значительные изменения в результативности эконометрических методов происходят и ожидаются от применения новых информационных технологий и их способности обрабатывать и анализировать огромные массивы данных.

Повышение требований к результатам эконометрического исследования и существенное расширение круга экономических задач, требующих эконометрических методов решения, происходит в условиях информационного общества, когда «цена» знания резко возрастает. Время



«ускоряется» и решения эконометрических задач требуется получить в режиме реального времени.

Растут требования со стороны государственных структур к специалистам высшей категории, которых готовят университеты. Последние должны сформулировать задачу и предложить модель экономического процесса, учитывающую реалии информационного общества [1]. Студенты, получившие знания по традиционному курсу экономики, практически не могут использовать их на рабочих местах в министерствах и фирмах и обречены на переучивание на своём рабочем месте после окончания университета.

Время требует разработки концепции новых экономических моделей, учитывающей как потребности современного общества, так и возможностей передовых информационных технологий (BigData, систем аналитики, нечёткой логики и др.), возможностей информационных ресурсов.

Одной из причин неудач использования традиционных экономических моделей для объяснения и предсказания поведения экономических систем и принятия управленческих решений является «неожиданное» появление событий, которые влияют на характеристики (переменные) и параметры экономических объектов и делают результаты эконометрического моделирования неудовлетворительными. Для преодоления названных выше недостатков, в отличие от классических методов экономического моделирования, новые модели должны дополнительно включать факторы (переменные), которые представляют собой случайные события, влияющие на факторы (переменные) модели и изменяющие их значения. В информационном обществе доминирующие экономико-социальные функции и процессы все больше оказываются организованными по принципу сетей. Именно сети составляют новую социальную морфологию наших обществ, а распространение «сетевой» логики в значительной мере сказывается на ходе и результатах процессов, связанных с производством, повседневной жизнью, культурой и властью. В новой концепции моделирование, учитывающие вероятность появления случайных событий, на наш взгляд, должны являться базовыми для построения моделей, призванных за-

менить модели линейной множественной регрессии и временные ряды.

Следующей парадигмой концепции экономического моделирования, которую можно назвать сетевой, является возрастающая роль фактора времени. Традиционные экономические законы, концепции и модели действуют только в ограниченном диапазоне пространства–времени и оказываются неудовлетворительными вне его.

Построенные на «исторических» данных эконометрические модели могут быть использованы только при условии, что сегодня и завтра не случится ничего нового, что является весьма грубым приближением. Кроме того, построенные на этом предположении модели не могут быть успешно использованы в практике управления процессами в реальном масштабе времени [2].

Автором разработана технология использования нейронных сетей. Реализована волновая схема последовательности расчетов в нейронах. При этом нейрон хранит не значение параметра, а уравнение взаимосвязи факторов.

Предлагается учет и поиск сложных связей экономических факторов реализовать на основе регрессионных уравнений (линейное, гипербола, логарифмическое). В нейронной сети по отчетным динамическим рядам для каждого нейрона сохраняются коэффициенты уравнений которые определяются на обучающем интервале. Критериями оценки модели предлагается минимальное отклонение фактических данных от расчетных на тестируемом интервале. Предлагаемая технология функционирования нейронной сети позволяет точнее воспроизводить процесс функционирования экономики.

#### Литература

1. Мелюшин П.В., Хмель С.А., Казачинская Е.А. Оптимальный алгоритм проектирования устойчивых к сбоям информационных систем обработки электронных медицинских записей. НАУКА И ТЕХНИКА Мн. № 3. 2014.

2. Мелюшин П.В. Моделирование надежных информационных систем обработки электронных медицинских записей, Материалы 8-ой международной конференции «Приборостроение – 2015».

УДК 51(07.07)

### ТЕСТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРЕПОДАВАНИИ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Кондратьева Н.А., Мелешко А.Н., Канашевич Т.Н.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Одной из современных технологий контроля и диагностики учебных достижений обучающихся в техническом университете является тестовая технология. Традиционно в практике обучения сложилось мнение, что назначение тестирова-

ния – выявление уровня усвоения знаний. Кроме контролирующей функции тестирование реализует и другие важные функции: диагностическую, обучающую, организующую, развивающую, воспитывающую. С помощью заданий в

тестовой форме можно создать условия не только для контроля уровня подготовки, но и для развития личности. По мнению педагога В. Аванесова, тестовые задания меняют учебный процесс в сторону улучшения специально организованной самостоятельной работы. Действительно, тестирование выявляет как общую картину усвоения учебного материала каждым студентом, так и группой в целом, что позволяет эффективно построить индивидуальную работу с разными категориями студентов, как с теми, кто успешно осваивает учебную дисциплину, так и с испытывающими трудности в обучении. Регулярность применения тестового контроля дисциплинирует, организует и направляет деятельность обучающихся, помогает выявить и устранить пробелы в знаниях, формирует стремление развивать свои интеллектуальные способности и учебные умения. Кроме того, тестовые задания закрытой формы предоставляют возможность тестируемому увидеть корректную запись правильного ответа среди предлагаемых для выбора вариантов. Выполнение тестовых заданий стимулирует также развитие логического мышления, интуиции, мыслительных операций – сравнения, обобщения, анализа, поиска альтернатив и т.д. Кроме того, у тестируемого есть возможность найти правильный ответ, используя метод исключения – посредством определения заведомо абсурдных вариантов и проверки оставшихся на соответствие заданным условиям. Соревновательный, конкурирующий характер тестирования повышает заинтересованность студентов в получении высокого результата, способствует повышению интереса к учебной дисциплине.

Педагогический тест можно охарактеризовать как результат взаимодействия содержания заданий с наиболее подходящей формой его организации. Форма заданий в тесте может быть двух типов: открытой и закрытой. Тестовые задания *закрытого типа* сопровождаются готовыми вариантами ответов, из которых необходимо выбрать один или несколько правильных, установить соответствие или верную последовательность конечного множества элементов. Тестовые задания *открытого типа* построены таким образом, что испытуемый должен предложить свой ответ: дописать символ, значение, знак арифметического действия, формулу и т. п.

По видовым особенностям тестовые задания можно дифференцировать по требованию к предоставляемому ответу: с однозначным или многозначным выбором ответа, на необходимость дополнения или конструирования ответа, на самостоятельное получение ответа, на установление соответствия между элементами двух множеств, на установление правильной последовательности элементов множества (указание по-

рядка элементов, действий или процессов, перечисленных в условии) [1].

Использование метода тестирования упрощает процедуру проверки, позволяет студентам без привлечения преподавателя выполнить само- и взаимопроверку, предоставляет возможность проверить не только знание, но и понимание учебного материала. Данный метод позволяет не только рационально дифференцировать материал в зависимости от индивидуальных особенностей студентов, но и предоставляет возможность расширения или дробления шкалы оценивания. Таким образом, студент получает некоторое право на ошибку при сохранении возможности получения положительной оценки. Объективность проверки результатов тестирования за счет сокращения влияния субъективного мнения проверяющего работу – еще одно из преимуществ метода. Таким образом, даже при низком результате тестирования у студента не возникает сомнения в непредвзятости педагога.

В преподавании математики студентам технических специальностей ППС кафедры «Инженерная математика» использует тесты на различных этапах практических занятий, в ходе индивидуальной, групповой и фронтальной работы со студентами, в сочетании с другими средствами и приемами обучения. Выбор типа и вида тестового задания определяется целями практического занятия, характером учебного материала, индивидуальными особенностями студентов группы.

При составлении многовариантных заданий для текущего контроля и итоговой оценки уровня знаний обучающихся в форме тестирования важно, чтобы условия выполнения задания для каждого из тестируемых были равнозначны. Все варианты задачи должны удовлетворять ряду требований, таким как единый алгоритм решения, одинаковый объем операций и уровень сложности, стандарт представления результата и т. д. [2]. При этом тестируемый может выбрать свой способ решения, если это не оговорено иначе.

Поэтому удобно конструировать само задание и алгоритм его решения в общем виде с параметрами, согласно которым для каждого варианта придаются конкретные числовые значения, придерживаясь названных выше и других необходимых для данного задания требований. Возможны различные постановки заданий: получить окончательный результат, дать комбинированный ответ на несколько вопросов (задач), поэтапно решать отдельные фрагменты определенного алгоритма решения задачи, другие формы.

Приведем примеры тестовых заданий открытого типа на нахождение окончательного результата.

1. Найдите произведение наименьшего и наибольшего целых решений неравенства  $\log_{x-b} a^{x^2-(x_1+x_2)x+x_1x_2} \leq k(x_2 - x)$ .

Решение неравенства опирается на исследование свойств функций в левой и правой частях неравенства. Подбираем параметры

$a, b, k, x_1, x_2$  – целые числа. Искомое произведение равно  $(b + 2)x_2$ .

2. Компания ведет строительство  $K_1\%$  домов по первому типовому проекту и  $K_2\%$  домов по второму. При строительстве по первому проекту нарушение технологий происходит с вероятностью  $p_1$ , а по второму –  $p_2$ . Какова вероятность того, что случайно выбранный дом построен с нарушением технологий? В построенном доме допущены нарушения. По какому проекту он вероятнее всего был построен?

В решении задачи используются формулы полной вероятности и Байеса.

Коллективом преподавателей кафедры «Инженерная математика» изданы методические пособия для текущего контроля знаний студентов общетехнических специальностей, которые состоят из четырех частей и пятого издания под названием «Специальные разделы». Пособия включают теоретические вопросы и широкий спектр задач по дисциплине «Математика». Для проверки усвоения студентами теоретических основ в начале каждого раздела пособий размещен список контрольных вопросов, направленных на раскрытие понимания сути основных теорем и формул в процессе подготовки к тестированию. Для каждого модуля разработаны проверочные тесты в 30 вариантах, каждый из которых состоит из комплекта задач с набором ответов. Издания содержат тесты по разделам: «Линейная и векторная алгебра», «Аналитическая геометрия», «Пределы», «Производная и ее приложения», «Определенный интеграл и его приложения», «Двойные и тройные интегралы и их приложения», «Криволинейные, поверхностные интегралы и их приложения». Задачи теории поля», «Дифференциальные уравнения и системы», «Ряды», «Элементы тео-

рии функций комплексной переменной и операционного исчисления», «Теория вероятностей. Элементы математической статистики».

Использование тестовых технологий при проверке математических знаний студентов позволяет обеспечить: 1) осуществление автоматического контроля посещаемости; 2) стимулирование студентов к внимательному восприятию текущего лекционного материала; 3) повышение мотивации студентов при подготовке к практическим занятиям; 4) оценку усвоения учебного содержания за любой период в семестре и итоговую аттестацию по всему курсу; 5) получение объективной интегральной оценки качества знаний студентов в целом по изученной дисциплине; 6) приобретение студентами навыков успешного прохождения тестирования; 7) оценку соответствия содержания занятий учебным программам; 8) синхронизацию и индивидуализацию работы студентов; 9) контроль качества работы преподавателей.

Следовательно, применение тестовых технологий для диагностики учебных достижений обучающихся в сочетании с классической системой контроля качества знаний студентов позволяет организовать более эффективный образовательный процесс при изучении математики в техническом университете.

#### Литература

1. Крокер, Л. Введение в классическую и современную теорию тестов: учебник /Л. Крокер, Дж. Алгина; под общей ред. В.И. Звонникова и М.Б. Чельшковой. – М. : Логос, 2012. – 668 с.

2. Мелешко, А.Н. Построение уравнений и неравенств на основе свойств функций. / А.Н. Мелешко, Н.А. Кондратьева // Материалы 13-й МНТК «Наука–образованию, производству, экономике», Минск : БНТУ, 2015. – Т.3. – С. 409.

УДК 37.03

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Кондратьева Н.А., Прихач Н.К., Прусова И.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

За два последних десятилетия многие аспекты математики как учебной дисциплины изменились. Эти изменения связаны с техническим прогрессом и внедрением во многие сферы информационных технологий. Одной из важнейших задач современной системы образования является повышение уровня знаний учащихся, формирование благоприятных условий учебного процесса. Для выполнения этих задач необходимо использование новых форм обучения, изменение существующих методов и средств, учитывая исполь-

зование возможностей информационных технологий. Достигнутый уровень прогресса привел к увеличению объема учебного материала по дисциплине «Информатика», что напрямую влияют и на методики преподавания этого предмета. Притерпели изменения и подходы к чтению математических дисциплин.

Известно, что компьютерные сети сделали дистанционное образование более доступным, что позволило вывести качество образования на новый уровень. Также компьютерные сети

намного облегчили совместное использование учебных ресурсов. Технический прогресс влияет и на гуманитарные дисциплины, такие как педагогика. Появляются возможности провести интерактивные занятия, он-лайн лекции, применять новейшие разработки, с привлечением возможностей информационных технологий.

Демонстрационное программное обеспечение, компьютерные проекторы и персональные компьютеры привели к значительным изменениям в преподавании информатики и математики в техническом университете. В планировании содержания читаемых курсов по дисциплинам «Математика», «Прикладная математика», «Информатика» [1, 2], «Теория вероятностей» рекомендуется учитывать эти изменения в организации учебного процесса. Бурное распространение компьютерных технологий приводит к множеству изменений, влияющих на обучение, включая и общее увеличение уровня осведомленности студентов в области информатики и ее применению к решению прикладных инженерных задач.

Обучение математике в техническом университете позволяет установить межпредметные связи с предметами, соответствующими выбранной студентом специальности. Укреплению этих связей способствует проведение самостоятельных исследований студентом в рамках курсового проектирования в первые годы обучения в университете [3]. Важным является принцип подкрепления теоретических сведений практикоориентированными задачами и проведением научно-исследовательской работы с закреплением и применением полученных знаний на практике.

На кафедре «Инженерная математика» приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета подготовлен в 2017-2018 учебном году электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Математика» в соответствии с существующими требованиями для опубликования и подготовки электронных изданий. ЭУМК «Математика. Раздел «Математическое программирование» охватывает разделы курса в объеме, предусмотренном учебными и рабочими программами для студентов экономической специальности 1-27 01 01-08 «Экономика и организация производства» (приборостроение) приборостроительного факультета БНТУ. Этот комплекс содержит необходимые материалы для подготовки к экзамену. Он включает теоретические сведения, примеры решения типовых заданий в аналитической, графической форме и с помощью пакета Microsoft Excel, набор задач для самопроверки знаний, а также вопросы к каждой теме и экзамену, список рекомендуемой литературы. Теоретические и практические сведения включают разделы [6]: «Классификация задач линейного программирования», «Графический метод решения задачи

линейного программирования», «Симплекс-метод», «Двойственность в линейном программировании», «Двойственный симплекс-метод», «Закрытая и открытая модели транспортной задачи», «Элементы теории игр», «Модели целочисленного линейного программирования».

Материал содержит примеры решения задач с подробными комментариями, доступен для самостоятельного изучения студентами дневной и заочной форм обучения, размещен в репозитории БНТУ, что позволяет выработать у студента мотивацию к самообразованию, умения работать с книгой, систематизировать и анализировать полученную информацию, делать выводы, а также проводить рефлексию по окончанию выполненных заданий.

Высокая скорость изменений в сфере информационных технологий мотивирует к изменению стратегии преподавания и таких актуальных для инженеров дисциплин, как «Прикладная математика». Осуществляется смещение акцента с решения традиционных классических задач и овладения методов вычислений к решению современных задач, для решения которых необходимо привлекать возможности информационных технологий. К этим задачам относятся оценка погрешности функции, соответствующие поставленной задаче; оценка накопленной погрешности; выбор регрессионной зависимости; овладение численными методами решения СЛАУ и освоение методики определения «наилучшего» метода при решении конкретной задачи. Актуальным остается вопрос сравнения аналитического решения, полученного вручную, с численным решением, полученным с привлечением компьютерных пакетов инженерных расчетов.

При обработке инженерных расчетов часто возникает необходимость работы с сигналами, их обработка, фильтрация, восстановление. В разработанном комплексе рассматривается возможность выдачи домашнего задания студентам на тему «Разложение сложного сигнала в ряд Фурье. Оценка точности результата».

В курсе «Прикладная математика» для студентов специальности «Метрология, стандартизация и сертификация» рассматривается использование пакетов прикладного назначения для решения практических задач по темам анализа и обработки статистических данных.

При оценке качества математической подготовки студентов технического университета важным является изучение [4]:

1. мотивационноценностного аспекта;
2. когнитивно-содержательного аспекта;
3. операционно-деятельностного аспекта процесса обучения математическим дисциплинам.

Мотивационно-ценностный компонент характеризуется ценностными ориентациями, установками и мотивами студента [5]. Этот аспект

отражает качества личности студента через его систему убеждений, ценностных ориентаций, индивидуальных норм поведения, которые в совокупности образуют управленческое мировоззрение его личности. В когнитивном аспекте отражена теоретическая обеспеченность компетентности студентов технического университета. В этом аспекте учитывается сформированный комплексный кругозор студента, и так необходимая учащимся системность мышления. Наличие глубоких теоретических знаний и осознанное выделение элементов деятельности позволяет подходить комплексно к решению технических задач с привлечением информационных технологий.

Операционально-деятельностный компонент определяет прикладной аспект управленческой деятельности будущих инженеров и отражает уровень овладения умениями и навыками. При математической подготовке студентов важным является развитие у них критического и практического мышления, а также, четкое использование полученных знаний при решении различных стандартных и нестандартных задач [5]. Данные компоненты позволяют детально подойти к вопросу оценки качества математической подготовки, объективно оценить уровень сформированных компетенций.

#### Литература

1. Прихач, Н.К. Использование информационных технологий в реализации процесса обучения / Н.К. Прихач, И.В. Прусова // Наука–образованию, производству, экономике: материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 3. – С. 401.

2. Прихач, Н.К. Методические основы процесса обучения в дисциплине «Математика» в высшем техническом учебном заведении / Н.К. Прихач, И.В. Прусова // Наука–образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 3. – С. 458.

3. Методические аспекты оценки качества выполнения курсовых работ по дисциплине «Информатика» студентами ПСФ / Н.А. Кондратьева [и др.] // Приборостроение–2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 1–3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 417–419.

4. Бровка, Н.В. Оценка качества математической подготовки студентов на основе интеграции теории и практики обучения // Информатизация образования–2010: педагогические аспекты создания информационно-образовательной среды: материалы междунар. науч. конф., 27–30 окт. 2010 г. – Минск : БГУ, 2010. – С. 75–80.

5. Павлова, Л.Н. Педагогическое управление как объект исследования трудовой функции // Теория и практика общественного развития. – 2014. – № 1. – С. 212–214.

6. Кондратьева, Н.А. Методическое обеспечение по дисциплине «Математика» для студентов экономических специальностей ПСФ БНТУ / Н.А. Кондратьева, Н.К. Прихач // Наука–образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 3. – С. 460.

УДК 37.03

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ К ОЛИМПИАДАМ. РАЗДЕЛ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ»

Гундина М.А., Кондратьева Н.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Ежегодно тысячи учащихся белорусских учебных заведений принимают активное участие в олимпиадном движении по математике. При организации процесса подготовки учащихся к олимпиаде и для достижения высоких результатов важным аспектом является затраченные силы педагога, который разрабатывает авторскую программу подготовки, следует от выбора материала к проведению факультативных стимулирующих занятий. Такие программы направлены на учет специфики предмета, его практикоориентированную составляющую.

Воспитание и обучение одаренной личности всегда оставалось актуальной задачей педагогики. Современные условия жизни требуют все

активную позицию педагога, нестандартный подход к решению задач, выработку соответствующих качеств у подрастающего поколения. Важным вопросом является не только выявление одаренных учащихся, но также и создание благоприятных условий для их развития, подготовку методологического аппарата для работы с такой молодежью. При разработке такого методологического аппарата для подготовки студентов технических университетов, в первую очередь, необходимо учитывать, что математические дисциплины для студентов не являются профильными, а значит и система подготовки должна быть разработана с учетом интенсивности учебного процесса по общеобразовательным дисциплинам.

Именно математические олимпиады позволяют студенту познать и проявить себя не только в той специальности, которую он получает, но и дают возможность самоутвердиться. В этой ситуации даже самые незначительные достижения студента порождают в нем веру в свои возможности.

Подготовка студентов технических университетов к олимпиаде по математике может осуществляться на дополнительных занятиях. При организации подготовки необходимо учитывать следующие аспекты.

Первым этапом является систематическое проведение стимулирующих факультативных занятий по математике, которые направлены на овладение специфическими приемами и методами. Многие из них не входят в общую учебную программу по данной дисциплине. Такая подготовка должна быть содержательной и мотивирующей, отвечающей интересам и запросам учащихся.

При проведении олимпиады необходимо учитывать регулярный характер мероприятия, его четкую организацию, продуманную поэтапность (отборочные туры, основной тур), подбор нестандартного содержательного материала по предмету.

Вопросами содержания обучения при подготовке к математическим олимпиадам посвящены работы О.Н. Шамоило, А.И. Попова, П.В. Сергеева. В работах уделяется внимание обоснованности содержания обучения с опорой на материал уже прошедших олимпиад. При подготовке к олимпиадам по математике необходимым является разбор задач по основным разделам различных математических дисциплин [1]:

- 1) линейная алгебра;
- 2) векторная алгебра;
- 3) основы аналитической геометрии;
- 4) введение в математический анализ;
- 5) дифференциальное исчисление;
- 6) интегральное исчисление;
- 7) обыкновенные дифференциальные уравнения;
- 8) числовые и функциональные ряды;
- 9) функции комплексного переменного;
- 10) операционное исчисление;
- 11) основы дискретной математики и логики;
- 12) теория вероятностей и математическая статистика;
- 13) элементы вычислительной математики;
- 14) абстрактная алгебра.

При подготовке студентов технических университетов к олимпиаде по математике рекомендуется рассмотреть следующие задачи раздела «Дифференциальные уравнения»:

1. Обыкновенные дифференциальные уравнения.
2. Дифференциальные уравнения первого порядка.

3. Дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными.

4. Однородные дифференциальные уравнения.

5. Линейные дифференциальные уравнения первого порядка, уравнения Бернулли.

6. Дифференциальные уравнения второго порядка, допускающие понижение порядка.

7. Линейные однородные уравнения  $n$ -го порядка, свойства их решений.

8. Теорема о структуре общего решения линейного однородного ДУ.

9. Теорема о структуре общего решения линейного неоднородного дифференциального уравнения.

10. Линейные однородные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами.

11. Линейные неоднородные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами и со специальной правой частью.

12. Задачи, приводящие к дифференциальным уравнениям.

13. Практикоориентированные задачи, приводящиеся к дифференциальным уравнениям.

14. Экспериментальные задачи, в постановке которых используются дифференциальные уравнения.

Примеры задач.

1. Какая кривая обладает следующим свойством: ее отрезок, заключенный между точкой касания и осью абсцисс, делится осью  $Oy$  пополам?

2. Найти такую форму зеркала, которая предусматривает отражение всех лучей, которые выходят из определенной точки, параллельно исходному направлению.

3. Сосуд емкостью 10 литров наполнен раствором, содержащим 1 кг соли. В одну минуту в него втекает 0,3 литров воды и столько же раствора перекачивается во второй сосуд емкости 10 литров, наполненный водой, из которого избыток жидкости выливается. В какой момент времени общее количество соли в двух сосудах будет одинаково?

4. Найти такую кривую, для которой радиус кривизны равен кубу нормали; данная кривая проходит через точку  $M(0;1)$  и имеет в этой точке касательную, составляющую с осью  $Ox$  угол, равный наклону биссектрисы прямого угла [2, 3].

В основе подготовки к математическим олимпиадам лежит решение задач и овладение нестандартными подходами к их решению. Олимпиадные задачи по математике в высшей школе включают в себя следующую структуру: совокупность объектов; отношения между этими объектами; требование или вопрос задачи, на который найти ответ; множество операций с объектами для получения необходимого выво-

да. На основе использования в учебном процессе и факультативной деятельности студентов олимпиадных задач по математике выделяют набор умений учащихся, которые необходимы для формирования математических компетенций [3]:

- 1) самостоятельно формулировать проблемную ситуацию;
- 2) анализировать исходные данные задачи;
- 3) оценивать идею задачи и ее решение;
- 4) модифицировать готовую систему знаний;
- 5) переход от сложной задачи к последовательности простых задач, которые решаются стандартными методами и приемами.

Решение олимпиадных задач по математике способствует у студентов формированию умений и навыков следующего характера [4]:

- развитие способности к логическому мышлению;
- овладением навыком формулировки и проверки гипотез;
- формирование уверенного суждения;
- развитие устремлений к самообразованию;
- закрепление навыков логичности;
- формирование умений обосновывать свою точку зрения;
- развитие навыка самостоятельной деятельности при временных ограничениях.

Предлагаемые на олимпиадах задачи носят творческий характер, что позволяет формировать у учащихся мышление будущего исследователя. Овладение нестандартными приемами и методами для формирования соответствующих умений и навыков может осуществляться на аудиторных

и факультативных занятиях, а также в форме творческих домашних заданий. На лекциях рекомендуется подчеркивать универсальность математических методов, практическую применимость теорем и результатов, прикладной характер сформулированных подходов. На практических занятиях рекомендуется включать некоторое количество задач повышенной сложности, показывающих своеобразные идеи, многообразие методов и способы их применения [3]. При факультативных занятиях и на занятиях в малых группах углубленно рассматривать экспериментальные задачи, которые в своем решении могут использовать дифференциальные уравнения, а также практикоориентированные задачи.

#### Литература

1. Шамайло, О.Н. Математическая олимпиада в вузе / О.Н. Шамайло // Вестник Астраханского государственного технического университета. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2008. – Т 1. – № 1. – С. 211–214.
2. Запорожец, Г.И. Руководство к решению задач по математическому анализу / Г.И. Запорожец. – Москва : Высш. шк., 1966. – 464 с.
3. Сухая, Т.А. Задачи по высшей математике / Т.А. Сухая, В.Ф. Бубнов. – Минск. : Высш. школа, 1993. – 412 с.
4. Телкова, С.А. О методике подготовки курсантов высших учебных заведений МВД России к математическим олимпиадам / С.А. Телкова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 2. – С. 28–29.

УДК 539

### УЧЕТ РАЗУПРОЧНЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ

Гундина М.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Процесс развития микротрещин в металле при деформировании имеет сложный многоуровневый характер и решение соответствующих задач является трудоемким. Развитие системы микротрещин сопряжено с возникновением эффекта разупрочнения материала, т. е. уменьшения значений компонента тензора напряжений при увеличении значений девиатора деформаций.

Актуальной задачей является определение предельного равновесия конструкции и определение прочности материала с учетом данного эффекта.

Получим основные соотношения для упруго-пластического материала с учетом разупрочнения с использованием понятия поверхности деформирования. Предполагаем, что эффект разгрузки может быть описан линейным законом.

Ограничимся для простоты несжимаемым материалом, исследуя связи между девиаторами напряжений  $s_{ij}$  и деформаций  $e_{ij}$ .

Известно, что приращение компонентов тензора деформаций складываются из приращения упругих и пластических составляющих деформаций по закону:

$$d e_{ij} = d e_{ij}^e + d e_{ij}^p. \quad (1)$$

Введем в рассмотрение поверхность деформирования  $E$  и поверхность нагружения  $\Sigma$  в девиаторном пространстве  $e_{ij}$  и  $s_{ij}$  соответственно.

Рассмотрим непрерывную функцию [1]:

$$f(e_{ij}, e_{ij}^p, \chi_k) = 0, \quad (2)$$

которая описывает мгновенную поверхность деформирования, где  $\chi_k$  -- параметры, зависящие от значений  $e_{ij}^p$ .

Условие непрерывного изменения поверхности деформирования аналитически выражается следующим образом:

$$df = f_{,e_{ij}} d e_{ij} + f_{,e_{ij}^p} d e_{ij}^p + f_{,\chi_k} d \chi_k = 0. \quad (3)$$

Для активного процесса деформирования приращения пластических деформаций выражаются следующими формулами:

$$de_{ij}^p = g f_{,e_{ij}} f_{,e_{km}} de_{km}, \quad (4)$$

где функция  $g$  является функцией упрочнения.

Для упругой догрузки компоненты девиаторов напряжений и деформаций связаны законом:

$$de_{ij}^e = \frac{1}{2G} ds_{ij}. \quad (5)$$

Приращения компонент пластической деформации должны быть пропорциональны величине [1]:

$$de_{ij}^p = dK \cdot f_{,e_{ij}}, \quad (6)$$

где  $dK$  – числовой коэффициент, который может быть определен из условия непрерывности изменения поверхности деформирования.

Подставим эти выражения в условия непрерывности:

$$f_{,e_{ij}} de_{ij} + f_{,e_{ij}^p} dK \cdot f_{,e_{ij}} + f_{,\chi_k} d\chi_k = 0. \quad (7)$$

Если изменение  $\chi_k$  линейно связано с изменением пластических деформаций:

$$d\chi_k = c_{ij} de_{ij}^p. \quad (8)$$

Выражаем из этого соотношения числовой коэффициент  $dK$ :

$$dK = \frac{-f_{,e_{ij}} de_{ij}}{f_{,e_{ij}^p} \cdot f_{,e_{ij}} + f_{,\chi_k} c_{ij} f_{,e_{ij}}}. \quad (10)$$

Тогда при активном нагружении:

$$de_{ij}^p = dK \cdot f_{,e_{ij}} = g \cdot f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} \cdot de_{km}. \quad (11)$$

где  $g = \frac{-1}{f_{,e_{ij}^p} \cdot f_{,e_{ij}} + f_{,\chi_{ij}^p} c_{ij} f_{,e_{ij}}}$ .

Тогда приращение компонентов тензора деформаций принимают вид:

$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p = \frac{1}{2G} ds_{ij} + g f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} de_{km} \quad (12)$$

или

$$ds_{ij} = 2G de_{ij} - 2G \cdot g \cdot f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} \cdot de_{km}. \quad (13)$$

Представим соотношение (13) в векторной форме:

$$ds = 2G de - 2Gh(e)de, \quad (14)$$

где функция  $h(e) = g \cdot f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}}$  является функцией разупрочнения.

Функция разупрочнения может быть найдена по следующей формуле:

$$h(e) = \frac{-f_{,e_{km}}}{f_{,e_{ij}^p} + f_{,\chi_{ij}^p} c_{ij}}. \quad (15)$$

Переходя к тензорной форме в случае изотропного разупрочнения имеем поверхность деформирования

Тогда для функции  $f$  справедливо:

$$f = e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21} + e_{11}e_{33} - e_{13}e_{31} + e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32} - \chi_{ij}, \quad (16)$$

где  $\chi_{ij}$  – скалярный внутренний параметр состояния (параметр упрочнения).

Параметр упрочнения может быть определен различными способами. Одним из подходов является принятие за меру упрочнения величины достигнутой интенсивности деформации сдвига, тогда:

$$f_{,e_{11}} = e_{22} - \frac{e_{22}}{\sqrt{2(e_{11}e_{22} - e_{12}^2)}}, \quad (17)$$

$$f_{,e_{22}} = e_{11} - \frac{e_{11}}{\sqrt{2(e_{11}e_{22} - e_{12}^2)}}, \quad (18)$$

$$f_{,e_{12}} = 2e_{12} + \frac{\sqrt{2}e_{12}}{\sqrt{e_{11}e_{22} - e_{12}^2}}. \quad (19)$$

Тогда  $f_{,e_{11}^p}, f_{,e_{22}^p}, f_{,e_{12}^p}$  находятся аналогично заменой в предыдущем выражении  $e_{11}, e_{22}, e_{12}$  на  $e_{11}^p, e_{22}^p, e_{12}^p$ , где  $e_{11}^p, e_{22}^p, e_{12}^p$  могут быть выражены через компоненты полной деформации как

$$e_{11}^p = e_{11} - e_{11}^e, \quad (20)$$

$$e_{12}^p = e_{12} - e_{12}^e, \quad (21)$$

$$e_{22}^p = e_{22} - e_{22}^e. \quad (22)$$

Введем параметр, соответствующий переходному состоянию:

$$\kappa = \begin{cases} 1, & f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} \cdot de_{km} > 0, f = 0 \\ 0, & f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} \cdot de_{km} \leq 0, f \leq 0. \end{cases} \quad (23)$$

Тогда приращение девиатора деформаций принимает вид:

$$\begin{aligned} ds_{ij} &= 2Gd e_{ij} - 2G\kappa \cdot g \cdot f_{,e_{ij}} \cdot f_{,e_{km}} \cdot de_{km} = \\ &= 2Gd e_{ij} - 2G\kappa \cdot \frac{-1}{f_{,e_{ij}^p} \cdot f_{,e_{ij}} + f_{,\chi_{ij}^p} c_{ij} f_{,e_{ij}}} \times \\ &\times ((e_{22} - \frac{e_{22}}{\sqrt{2(e_{11}e_{22} - e_{12}^2)}})de_{11} + \\ &+ (e_{11} - \frac{e_{11}}{\sqrt{2(e_{11}e_{22} - e_{12}^2)}})de_{22} + \\ &+ (2e_{12} + \frac{\sqrt{2}e_{12}}{\sqrt{e_{11}e_{22} - e_{12}^2}})de_{12}). \end{aligned} \quad (24) \quad (3)$$

Пусть компоненты вектора перемещений представляются в виде асимптотического разложения для задачи о растяжении пластины, содержащей центральную прямолинейную трещину [2]:



$$u_r(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} U_n(\varphi) r^{\lambda_n}, \quad (25)$$

$$u_\varphi(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} V_n(\varphi) r^{\lambda_n}. \quad (26)$$

Пусть компоненты полной деформации будут представлены в виде:

$$e_{rr} = \sum_{n \geq 0} \lambda_n U_n(\varphi) r^{\lambda_n - 1}, \quad (27)$$

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} (u_{\varphi, \varphi} + u_r) = \sum_{n \geq 0} (V'_n + U_n) r^{\lambda_n - 1}, \quad (28)$$

$$e_{r\varphi} = \frac{1}{2} \sum_{n \geq 0} (U'_n + (\lambda_n - 1) V_n) r^{\lambda_n - 1}. \quad (29)$$

УДК 658

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЕРЕХОДА ОРГАНИЗАЦИИ НА АУТСОРСИНГ

Гурина Е.В., Михновец Д.Л., Петрович Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В течение последних двух десятилетий аутсорсинг стал одной из самых горячо обсуждаемых тем в мировой практике. Особенно много проблем возникает при организации аутсорсинговых структур за рубежом. Никто не желает видеть работу за границей, и законодатели любят использовать твердую позицию против угрозы аутсорсинга как объединяющей точки для их более широких бизнес-планов.

Однако в любой сфере деятельности аутсорсинг не обязательно означает работу за границей. Когда владельцы бизнеса говорят об аутсорсинге, они обычно думают о том, чтобы поручать контентную работу независимым работникам или полагаться на агентство по трудоустройству, чтобы отслеживать и размещать по своему усмотрению необходимые виды деятельности.

### *Преимущества и недостатки аутсорсинга*

В правильном контексте и разумно развернувшись, аутсорсинг может стать фантастическим способом для владельцев бизнеса в части повышения эффективности своей организации за счет снижения производственных издержек. Но это не означает, что практика не лишена недостатков. Аутсорсинг не подходит для каждой ситуации, и поэтому нужно тщательно анализировать существующую ситуацию, прежде чем принять решение об использовании аутсорсинга.

Переход на аутсорсинг характеризуется *значительными преимуществами* [1]:

#### 1. Большое количество экспертов.

Основная команда может быть профессиональной по нескольким аспектам, но никто не идеален во всем. Посредством аутсорсинга конкретных задач организации часто могут значительно повысить производительность за счет использования навыков экспертов в определенных областях.

#### 2. Быстрое выполнение задач.

Последовательность  $\{\lambda_n\}_{n=0}^{\infty}$  подлежит определению наряду с функциями  $U_n(\varphi)$ ,  $V_n(\varphi)$ . Затем эти соотношения подставляются в уравнения (20)–(22) для получения выражения функции  $f$ .

### Литература

1. Ключников, В.Д. Математическая теория пластичности / В.Д. Ключников. – М. : МГУ, 1978. – 208 с.
2. Гундина, М.А. Энергетические инварианты в теории упругопластических трещин / М.А. Гундина // Наука и техника, 2017. – № 4. – С. 355–362.

Одна из главных причин, по которой организации, как правило, прибегают к аутсорсингу, – это потому, оперативное решение поставленных задач. Если организация работает с ограниченным числом сотрудников, она может сделать все гораздо быстрее, отправив много задач, занимающих время, на фрилансеров или внешние агентства.

#### 3. Возможность сосредоточиться на задачах.

Еще одним преимуществом аутсорсинга является повышение свободы. Передав вспомогательные процессы, организация может сосредоточить свои навыки на укреплении и улучшении основных процессов, которые помогут сделать бизнес успешным.

#### 4. Возможность избежать некоторых рисков.

Одним из наиболее важных факторов в любом проекте является оценка и анализ рисков. Посредством передачи на аутсорсинг определенных процессов специалистам в соответствующих областях можно их компетенцией в планировании и смягчении потенциальных рисков.

#### 5. Сокращение расходов.

Как можно себе представить, аутсорсинг поэтапной работы почти всегда будет дешевле, чем найм постоянного штатного персонала. Компания не только сэкономит время и деньги на вербовке, но и прибыль будет также увеличена, чем на более короткие накладные расходы.

#### 6. Возможность круглосуточной работы.

Одним из основных преимуществ аутсорсинга за рубежом являются существенные различия, которые могут возникнуть с точки зрения часовых поясов и праздников. Хотя это может создать первоначальное препятствие логически, после его преодоления это может эффективно означать, что бизнес работал, даже когда вы крепко спали.

#### 7. Упрощенное управление проектами.

Если компания выбирает аутсорсинговые услуги через широкий спектр специализирован-

ных внешних веб-сайтов и онлайн-сервисов, то часто предоставляются динамичные и интуитивные платформы, которые помогут эффективно управлять тем, что необходимо выполнить, сроки выполнения, формы оплаты. Большая часть этих операций может быть автоматизирована, освобождая время для более важной работы.

#### 8. Упрощение трудовых отношений.

Довольно много небольших бизнес-команд – это сплоченные группы друзей и семьи, что является положительным моментом. Но когда сотрудники близки друг к другу, это также может привести к проблемам, когда работа не выполняется до требуемого уровня. Посредством аутсорсинга компания обычно сможет свести к минимуму рабочие отношения с простыми договорными соглашениями.

#### 9. Усилия более целенаправленны.

Еще одно упущенное преимущество аутсорсинга заключается в том, что он позволяет планировать и выполнять более эффективные целевые проекты, которые организация обычно не сможет выполнить, принять. Это дает бизнесу шанс принять новые риски и экспериментировать с различными методами воздействия. [2]

#### *Недостатки аутсорсинга*

##### 1. Потеря контроля выполнения заданий.

Если организации работает внешними агентствами или фрилансерами, они теряют контроль над тем, как эти задачи контролируются и выполняются. До тех пор, пока организация знает и доверяет тем, кого она наняла, это не должно быть огромной проблемой, но компания должна быть осторожна.

##### 2. Наличие скрытых затрат.

Хотя аутсорсинговая работа, как правило, считается более дешевой, компания также должна остерегаться того, чтобы ее сорвали. Аутсорсинговые компании или крупные агентства обычно просят владельцев бизнеса подписывать длительные договорные соглашения, они будут включать в себя много мелкого шрифта.

Если не уделять достаточного внимания текстам, организация может получить неожиданные издержки.

##### 3. Возрастающая угроза безопасности.

В наше время важно соблюдать осторожность при использовании данных о клиентах. Если планируется аутсорсинг процессов, требующих персональных данных, необходима гарантированная конфиденциальность другим лицам для безопасности своего бизнеса.

##### 4. Разделение финансовых проблем.

Хотя может быть выгодно привлекать экспертные агентства к участию в рисках, может быть довольно опасно связать бизнес с финансовым благополучием аутсорсинговой организации. Опять же, необходимо четкое изложение любых условий и положений в договорных соглашениях,

вполне вероятен финансовый удар, если договорные обязательства не смогут быть выполнены.

##### 5. Уменьшение уровня контроля качества.

Аутсорсинговые организации и некоторые фрилансеры часто могут мотивироваться прибылью, а не качественно выполненной работой. Это означает, что порученная работа может вернуться быстро, но она не будет соответствовать стандарту и качеству, которые клиенты ожидают от продуктов или услуг.

##### 6. Риск роста недоброжелательности со стороны потребителей.

Если организация занимается работой за границей (даже для написания одного блога), бизнес может столкнуться с недоброжелательством со стороны потребителей, которые проявили моральную позицию в отношении аутсорсинга. Правильно или неправильно, к лучшему или к худшему, некоторая форма критики часто неизбежна.

##### 7. Временные рамки сдвига.

Одним из основных недостатков аутсорсинга конкретных задач является риск того, что фрилансеры или партнерские агентства могут идти в разрез с основным заказчиком. В результате может быть сложно синхронизировать время выполнения работ и гарантировать, что клиенты получат обещанное им по надежной временной шкале.

##### 8. Возможная потеря своей основной цели.

Поскольку многие аутсорсинговые агентства или фрилансеры, как правило, обслуживают несколько клиентов в любой момент времени, то наличие множества целей может нанести ущерб основному бизнесу.

##### 9. Информация, потерянная при передаче.

Неважно, имеет ли организация дело с зарученными фрилансерами или каким-то талантливым экспертом только на улице, если она отдает удаленные работы по электронной почте или по телефону, смысл важных инструкций часто теряется при передаче. Это может вызвать у организации серьезные временные и денежные потери.

##### 10. Возможность столкнуться с моральными дилеммами.

Хотя это может и не быть проблемой для всех, основным недостатком аутсорсинга является то, что организация может отказывать своей команде или талантливым специалистам в важной работе или возможности развития.

Рост порождает рост, и, используя аутсорсинг, организация не может способствовать росту всего сообщества. [3]

#### **Литература**

1. Аникин Б.А., Рудал И.Л. Аутсорсинг и аутстаффинг: высокие технологии менеджмента: Учеб. пособие. – М. : ИНФРА-М, 2010. – С. 9.
2. Управление производством на аутсорсинге // [www.md-management.ru](http://www.md-management.ru).
3. Ермошкин Н., Что дает аутсорсинг? – Ведомости. – 2011. – 18 мая.

## СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ

Абдыев А.Д., Гундина М.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В первых работах, посвященных стереографической поверхности, описывается такой инструмент для определения координат звезд на небесной сфере, который называется астролябия. Одни из первых попыток изложить комплексно теорию стереографической проекции принадлежат ученому Ахмаду ал-Фергани, ей он посвятил свою книгу «Книга о построении астролябии».

Позже стереографическая проекция называлась «проекцией астролябии», а современное общеупотребимое название получила в 1831 г. Этот термин был введен немецким математиком Л.И. Магнусом (1790-1861). Термин происходит от греческих слов «стерон» – «пространственное тело» и «графейн» – «чертить, писать» [1].

Сейчас стереографическая проекция широко применяется в астрономии для проектирования поверхности Земного шара на плоскость, т. е. для составления карт, кроме этого, нашла применение при создании фильтров при обработке изображений, используя панорамные снимки. Это позволяет получить изображение, для которого области, удаленные от центра проекции, подвержены большему растяжению.

При обработке астрономических данных важным вопросом является введение двух координат, лежащих в основе системы – широты и долготы.

Применению стереографической проекции для составления карт посвящены работы Л. Эйлера (1707–1783) «О представлении стереографической проекции на плоскости», «О географической проекции сферической поверхности».

Исследования по этой тематике ведутся и в настоящее время. Этим вопросам посвящены статьи и материалы учебно-методического характера отечественных и зарубежных авторов [2, 3]

Стереографическая проекция используется при обработке космических сигналов. Такие сигналы может быть разложены на составляющие с помощью сферических гармоник.

Остановимся на вопросе применения вейвлетов для разложения сигнала, поступающего от источника, имеющего форму аппроксимируемую сферой (Солнце), на приемник, также имеющий такую же форму (Земля).

Для рассмотрения вейвлетов на сфере, необходимо описать геометрию на сфере, а ее, в свою очередь, построить как расширение евклидова пространства. Чтобы это расширение было корректно, необходимо соблюсти ряд условий:

1) полученный сигнал и вейвлеты должны полностью существовать на единичной сфере;

2) преобразование должно порождать локальное расширение некоторого вида на единичной сфере;

3) сферическое вейвлет-преобразование должно приблизиться локально к евклидовому преобразованию, по причине того, что сфера является асимптотически плоской, следовательно, любое сферическое вейвлет-преобразование должно соответствовать плоскому евклидову преобразованию в мелких масштабах, или эквивалентно, для большого радиуса кривизны (искривления).

Принцип соответствия между сферическим и евклидовым вейвлетом был подобно описан в работе Вьё, Жака и Вандерхейнста «Принцип соответствия между сферическими и евклидовыми вейвлетами» [4]. Этот принцип связывает понятия плоских евклидовых вейвлетов со сферическими вейвлетами, используя стереографическую проекцию.

Используя стереографическое проектирование, определим аффинные преобразования на единичной сфере, которые способствуют выбору базисного вейвлета на единичной сфере.

Сферическое вейвлет-преобразование может быть определено как проектирование на базис, где сферические вейвлеты должны удовлетворять соответствующему критерию допустимости, чтобы гарантировать восстановление исходного сигнала.

Заметим, что условие допустимости для определения вейвлетов на сфере оказывается трудно проверяемо на практике [4].

Чтобы построить соответствие между вейвлетами на плоскости ( $R^2$ ) и на сфере ( $S^2$ ), оператор проектирования между двумя пространствами должен быть замкнут.

В статье [5] указывается на то, что стереографическая проекция является единственным унитарным, радиальным и конформным отображением между сферой и плоскостью.

Единичная сфера, на которой определены сферические вейвлеты, сосредоточена в начале отсчета ортогональной декартовой системы координат  $(O, O_x, O_y, O_z)$  в трехмерном пространстве со сферическими координатами  $(\theta, \varphi)$ .

Удобно рассматривать, для простоты и без потери общности, что плоскость, на которой определены евклидовы вейвлеты, параллельна плоскости  $(O_x, O_y)$  и проходит через северный полюс  $z_0$ . Полярные координаты  $(r, \varphi)$  на плоскости определены относительно системы  $(O, O_x, O_y)$ .

Пусть плоскость касается сферы в северном полюсе  $z_0 = 1$ . Возникает необходимость непрерывной дифференцируемой биекции между  $S^2$  и  $R^2$ , которая связывает радиальные переменные  $r$  на плоскости и  $\theta$  на сфере независимо от  $\varphi$ .

Пусть  $\varphi$  – долгота,  $\theta$  – широта,  $\Pi$  – оператор стереографической проекции, а оператор  $\Pi^{-1}$  – обратный к оператору стереографической проекции, точка  $S$  соответствует южному полюсу.

Точка на сфере определяется следующими координатами  $(\theta, \varphi)$ , где  $\theta \in [0, 2\pi]$ ,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ . Точка на касательной плоскости определяется координатами  $(r, \varphi)$ . Касательная плоскость проходит через северный полюс.

Сtereoграфическая проекция определяется проектированием точки на единичной сфере в точку на плоскости, касающейся сферы в северном полюсе, вдоль луча, исходящего из южного полюса.

Оператор проектирования реализуется следующим образом:

$$\Pi: \omega \rightarrow x = \Pi\omega = (r(\theta), \varphi), \quad (1)$$

где полярный радиус  $r(\theta) = 2tg(\theta/2)$ , а ему соответствующая точка на сфере  $\omega = (\theta, \varphi) \in S^2$  определяют сферические координаты широтой  $\theta$  и долготой  $\varphi$  и  $x \in R^2$  – точка на плоскости, определяемая координатами  $(r, \varphi)$ . Поскольку есть возможность восстановления сигнала, обратный оператор  $\Pi^{-1}$ :

$$\Pi^{-1}x = (\theta(r), \varphi), \quad (2)$$

где  $\theta(r) = 2arctg(r/2)$ .

Растяжение на сфере вводится на основе стереографической проекции, и может определяться на сфере.

Вращение на единичной сфере характеризуется элементами группы вращений  $SO(3)$ , которая параметризуется в терминах трех эйлеровых углов.

Тогда вращение для интегрируемых функций  $f \in L^2(S^2, d\Omega)$  определим следующим образом:

$$[\mathfrak{R}(\rho)f](\omega) = f(\rho^{-1}\omega), \quad \rho \in SO(3). \quad (3)$$

УДК 631.15:33

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Оганезов И.А.<sup>1</sup>, Атаев С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Дайханское объединение «Чарлакян» Векилбазарского этрапа Марыйского велаята Мары, Республика Туркменистан

Одной из основных задач энергетической политики Республики Беларусь наряду с устойчивым обеспечением страны энергоносителями является создание условий для функционирования и развития экономики при максимально эффективном

использовании топливно-энергетических ресурсов. Достигнутые сегодня результаты в энергетике несколько смягчили, но не устранили кризисные явления в обеспечении страны энергоносителями,

Растяжение на единичной сфере строим переводом сферы на плоскость, применяя стереографическую проекцию, далее на плоскости применяем евклидово растяжение, а затем переводим полученный результат на сферу, используя обратную стереографическую проекцию.

Точку трехмерного пространства зададим с помощью однородных тетрациклических координат  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и считать, что уравнение сферы [6]:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - x_4^2 = 0. \quad (4)$$

Связь между координатами точек сферы и плоскости задается формулами

$$\sigma x_1 = X_1, \quad (5)$$

$$\sigma x_2 = X_2, \quad (6)$$

$$\sigma x_3 = \frac{1 - (X_1^2 - X_2^2)}{2}, \quad (7)$$

$$\sigma x_4 = \frac{1 - (X_1^2 + X_2^2)}{2}, \quad (8)$$

где  $X_1, X_2$  – однородные действительные координаты точки на плоскости,  $\sigma$  – множитель пропорциональности.

### Литература

1. Розенфельд, Б.А. Стереографическая проекция / Б.А. Розенфельд, Н.Д. Сергеева. – М.: Наука, 1973. – 48 с.
2. Apostol, T.M. Mathematical Analysis. A Modern Approach to Advanced Calculus / T.M. Apostol. – Pearson: Addison-Wesley, 1974. ISBN 0-201-00288-4.
3. Casselman, B. Mathematical Illustration. F manual of geometry and postscript / B. Casselman. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 20 p.
4. Wiaux, Y. Correspondence principle between spherical and Euclidean wavelets / Y. Wiaux, L. Jacques, P. Vandergheynst // Astrophys. J. – 2005. – V. 632. – № 1. – P. 15–28.
5. Schröder, P. Spherical wavelets: Efficiently representing functions on the sphere. / P. Schröder, W. Sweldens // Siggraph. – 1995. – P. 161–172.
6. Виноградов, И.М. Математическая энциклопедия / И.М. Виноградов // М.: Советская энциклопедия, 1977. – Т. 5. – С. 349–350.

так как доля энергоресурсов, добываемых на территории республики (нефть, попутный газ, торф топливный, дрова и пр.), остается на уровне 18 % от общей потребности в ТЭР (31,11 млн. т у.т.), что составляет 5,6 млн. т у.т. (тонн условного топлива) в год, нереализованный же потенциал энергосбережения оценивается в 30 % от общего потребления ТЭР, что эквивалентно 9,5-10 млн. т у.т.

Особое внимание в Республиканской программе по энергосбережению уделяется использованию местных видов топлива (МВТ) и нетрадиционных источников энергии (НИЭ).

Их динамичное широкое применение в Республике Беларусь очень важно по нескольким причинам. Во-первых, работы по их использованию будут способствовать развитию собственных технологий и оборудования, которые впоследствии могут стать предметом экспорта; во-вторых, эти источники, как правило, являются экологически чистыми; в-третьих, развитие таких источников повышает энергетическую безопасность государства.

Для обеспечения быстрой окупаемости затрат на нетрадиционную энергетику во всех случаях предпочтение следует отдать техническим решениям с использованием оборудования, выпускаемого на предприятиях республики, и с максимальным использованием местных материалов.

1. Пределные возможности Республики Беларусь по использованию дров в качестве топлива можно определить исходя из естественного годового прироста древесины, который приближенно оценивается в 25 млн. м<sup>3</sup>, или до 6,6 млн. т у. т. в год

2. Гидроэнергетические ресурсы сосредоточены на трех реках: Западной Двине, Немане и Днепре. Потенциальная мощность всех водотоков Беларуси составляет 850 МВт, в том числе технически доступный – 520 МВт, а экономически целесообразный – 250 МВт. На Западной Двине намечено сооружение наиболее крупного каскада из четырех ГЭС: Верхнедвинской (29 МВт), Полоцкой (23 МВт), Бешенковичской (30,5 МВт) и Витебской (40 МВт). За счет гидроэнергетических ресурсов к 2020 г. возможна выработка 715 млн. кВт\*ч и соответственно экономия 250 тыс. т у.т. в год.

3. Ветроэнергетический потенциал. На территории Беларуси выявлено 1840 площадок для размещения ветроустановок с теоретически возможным энергетическим потенциалом 1600 МВт и годовой выработкой электроэнергии 3,3 млрд. кВт\*ч. На данный момент в Новогрудском районе насчитывается 13 подобных установок, из них больше половины (7 ВЭУ) принадлежат частным инвесторам, а еще 6 ВЭУ мощностью по 1,5 мВт каждая – государственному предприятию «Гродноэнерго». Они объединены в небольшой ветропарк, расположенный близ д. Грабники. Это уникальное место, которое является вторым по высоте в нашей стране

(225 м над уровнем моря), уступая лишь Держинской возвышенности. Между тем высота, на которой находятся лопасти ВЭУ, имеет огромное значение: чем выше, тем сильнее и стабильнее воздушные потоки. Ожидается, что инвестиции в этот проект окупятся за 11 лет. После этого в течение длительного времени можно будет получать практически бесплатную электроэнергию (срок службы ВЭУ составляет 25 лет, но, как показывает практика, его можно увеличить). Однако в ближайшее время технически возможное и экономически целесообразное использование потенциала ветра не превысит 5 % от установленной мощности электростанций энергосистемы, т. е. может составить не более 300-350 МВт, или 720-840 млн. кВт\*ч электроэнергии (не более 300 тыс. т у.т. в год).

4. Биогаз из отходов животноводства. Результаты испытаний биогазовых установок для производства биогаза из отходов животноводческих комплексов подтвердили требование комплексной оценки их эффективности, т. к. их использование только для получения биогаза экономически неконкурентоспособно относительно других видов топлива. Основная составляющая эффекта состоит в том, что без дополнительных энергетических затрат можно получить экологически чистое высококачественное органическое удобрение и вследствие этого пропорционально сократить энергоемкое производство минеральных удобрений. Потенциально возможное получение товарного биогаза от животноводческих комплексов составляет 160 тыс. т у.т./год.

5. Отходы растениеводства и фиомасса. Использование отходов растениеводства в качестве топлива является принципиально новым направлением энергосбережения. Практический опыт их применения в качестве энергоносителя накоплен в Бельгии и странах Скандинавии, а в нашей республике опыт массового применения отсутствует. Общий потенциал отходов растениеводства оценивается до 1,46 млн. т у.т. в год. Целесообразные объемы их сжигания для топливных целей следует решать в сопоставлении с конкретными нуждами хозяйств в индивидуальном порядке, а к концу прогнозируемого периода эта величина оценивается на уровне 50-100 тыс. т у.т.

6. Твердые бытовые отходы (ТБО) В Республике Беларусь ежегодно накапливается около 2,4 млн. т твердых бытовых отходов, которые направляются на свалки и два мусороперерабатывающих завода (Минский и Могилевский), на которые ежегодно вывозится в год: бумаги – 648,6 тыс. т; пищевых отходов – 548,6 тыс. т; стекла – 117,9 тыс. т; металла – 82,5 тыс. т; текстиля – 70,8 тыс. т; дерева – 54,2 тыс. т; кожи и резины – 47,2 тыс. т; пластмассы – 70,8 тыс. т. Потенциальная энергия, заключенная в твердых бытовых отходах, образующихся на территории

республики, равноценна 470 тыс. т у.т. При их биопереработке с целью получения газа эффективность составит не более 20-25 %, что эквивалентно 100-120 тыс. т у.т. Кроме того, необходимо учитывать многолетние запасы ТБО, которые имеются во всех крупных городах и создают проблемы их складирования.

7. Солнечная энергия. До недавнего времени в Беларуси работало всего три десятка солнечных станций общей мощностью всего 41 МВт. Согласно госпрограмме «Энергосбережение» к 2020 году в стране планируется строительство солнечных электростанций суммарной мощностью не менее 250 МВт.

Проведенные нами исследования показывают возможный потенциал использования основных МВТ и НИЭ до 2025 года:

- древесного топлива до 6,6 млн. т у.т./год или до 21,22 %
- гидроэнергетические ресурсы до 250 тыс.т у.т. в год или до 0,8 %;
- ветроэнергетический потенциал не более 300 тыс.т у.т. в год или до 0,96 %;
- биогаз из отходов животноводства – 150 тыс. т у.т./год или до 0,48 %.
- отходы растениеводства (солома, костра, лузга и т. д.) и фитомасса до 1,4 млн. т у.т./год или до 4,5 %;
- бытовые органические отходы до 330 тыс. т у.т./год или до 1,06 %;
- солнечная энергия – до 50 тыс.т у.т. в год или до 0,16 %.

Суммируя полученные значения, определяем возможный потенциал использования основных МВТ и НИЭ в Республике Беларусь до 2025 года – 9,08 млн. т у.т./год или  $\approx$  до 29 % от общей потребности в топливно-энергетических ресурсах для национальной экономики Республики Беларусь.

УДК 658.5:378.1

## РОЛЬ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Козленкова О.В., Прикота Е.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Организация представляет собой объединение лиц по интересам, взаимодействующих друг с другом в рамках определенной разработанной политики для достижения общей цели.

Эффективность функционирования организации определяется степенью достижения целей, определенных менеджментом для снижения риска влияния неблагоприятных последствий на результат деятельности организации, а также уменьшением затрат. Условиями такой деятельности считаются: наличие оптимального числа квалифицированных сотрудников; четкость и рациональность распределения задач и функций; внутреннее равновесие и равновесие с окружающей средой; оптимизация технологий.

## Литература

1. Оганезов, И.А. Повышение эффективности использования нетрадиционных энергетических ресурсов в Республике Беларусь / И.А. Оганезов // *Економічний розвиток держави та її соціальна стабільність: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції*, 15 травня 2018 р. – Ч. 1. – Полтава : ФОП Пусан А.Ф., 2018. – С. 158–160.
2. Короткевич, А.М. Исследование экономической целесообразности строительства и эксплуатации фотоэлектрических станций в Республике Беларусь / А.М. Короткевич, А.С. Куксов, В.М. Буркин // *Энергетическая Стратегия* – 2015. – № 3. – С. 23–29.
3. Оганезов, И.А. Основные подходы создания демонстрационных энергосберегающих зон в агрогородках Республики Беларусь с использованием местных возобновляемых энергетических ресурсов / И.А. Оганезов, Т.Ю. Бузенкова // *Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых «Интеллектуальный потенциал XXI века : вклад молодых ученых в развитие аграрной науки», посвященной 85-летию Казахского национального аграрного университета (4–5 декабря 2015 г. / редколл. Т.И. Есполов (пред.) [и др.]. – Алматы : КазНАУ, 2015. – С. 151–155.*
4. Королевич, Н.Г. Повышение эффективности использования нетрадиционных энергетических ресурсов на сельских территориях Республики Беларусь / Н.Г. Королевич, И.А. Оганезов // *Исследования, результаты: Научный журнал Казахского национального аграрного университета* – 2017. – № 2. / редкол. Т.И. Есполов [и др.]. – Алматы : КазНАУ, 2017. – С. 264–273.

Методы управления являются основным рычагом достижения поставленных целей. В процессе управления участвует один из компонентов – управляемая система, которая представляет собой совокупность финансовых ресурсов, их оборот и воспроизводство, а также отношения, возникающие в результате этих процессов. Приоритетное направление в управляемой системе отведено управлению денежными оборотами, что связано с разного рода рисками, в том числе финансовыми.

Именно поэтому риски являются одним из важных элементов, который следует учесть при построении системы управления с учетом того, что в современном бизнесе используется

большая часть заемных (привлеченных) средств, последствия рисков становятся более острыми. Как показывает практика, рынку присущи не только высокие административные, правовые и налоговые риски, но и высокие политические риски, что также убеждает в необходимости внедрения системы управления рисками в организации.

Классический процесс управления рисками:

- выявление рисков;
- анализ и оценка рисков;
- управление рисками;
- мониторинг рисков;
- реагирование на образовавшийся риск.

Анализ причин, корректировка процессов с поправкой на риски;

- постоянная работа над созданием риск-ориентированной корпоративной культуры.

Эффективность управления риском зависит от умения применять методы и приемы, которые заключаются в снижении его степени. Можно выделить три основных способа снижения риска: отказ от риска (уклонение от мероприятия, связанного с риском); снижение риска (самострахование, диверсификация, минимизация); передача риска третьему лицу (страхование, распределение).

В совокупности разработка тактики управления риском и способов снижения риска в условиях конкуренции и административных рисков представляет собой новую для рынка категорию – «риск-менеджмент». Основной задачей риск-менеджмента является нахождение оптимального соотношения между прибылью, ликвидностью и риском.

До недавнего времени риск-менеджмент было принято считать отдельной системой управле-

ния, со своими процедурами, стандартами, процессами и документами (многие из которых служили только «для красоты»). Современный тренд – интеграция работы с рисками во все области управления, проекты, решения руководства, процессы. Примеры:

1. Если это процедура, которая регламентирует бизнес-процесс «управление денежными потоками», то в ней обязательно содержится перечень ключевых угроз или негативных событий (например, кассовые разрывы). Кроме того, должен быть представлен перечень действий, которые минимизируют наступление негативных событий.

2. Каждый документ управленческой отчетности и инвестиционного проекта содержит в себе оценку вероятности и размера риска. Тогда сразу ясно, что происходит в компании и каковы возможные сценарии развития событий.

Риск-менеджмент в ближайшем будущем должен стать неотъемлемой частью каждого преуспевающего предприятия, осуществляющего свою деятельность не только на финансовом рынке. Проблемы, связанные с возможной упущенной выгодой в деятельности предприятия, являются ключевыми при разработке концепции управления рисками в финансовой и производственной деятельности.

#### Литература

1. Малыхин, Д.В. Тестирование стратегии банка: уроки для рискменеджмента и внутреннего аудита / Д.В. Малыхин // Управление в кредитной организации. – 2013. № 4. СПС КонсультантПлюс.

УДК 658.5:378.1

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ, ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА Серченя Т.И.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Особенность современного этапа социально-экономического развития Беларуси состоит в том, что одновременно приходится решать задачи эффективности текущего функционирования, и опережающего развития. Для обеспечения опережающего развития важно обеспечить реализацию национальных конкурентных преимуществ. Долгосрочное развитие отраслей, регионов, всей национальной экономики обеспечивают преимущества «второй природы» – созданные факторы (ресурсы) – и в первую очередь человеческий капитал.

На сегодняшний момент, одним из основных и требующих быстрого решения вопросов является формирование адекватной инфраструктуры подготовки кадров. В соответствии с Концептуаль-

ными подходами к развитию системы образования Республики Беларусь до 2020 года и на перспективу до 2030 года система образования должна обеспечить соответствие получаемых знаний и навыков быстроменяющимся требованиям со стороны общества и экономики, техники и технологий, развитию личной инициативы и адаптируемости человека, благодаря которым расширяются его возможности генерировать идеи, создавать инновационный продукт [1]. Наиболее полно данным требованиям отвечает концептуальная модель развития университетов «Университет 3.0», на реализацию которой ориентирован приказ Министра образования № 757 от 01.12.2017 г. «О совершенствовании деятельности учреждений высшего образования на ос-

нове модели «Университет 3.0». Модель «Университет 3.0» подразумевает формирование не только предпринимательской инфраструктуры вузов, позволяющей выводить на рынок новые продукты и технологии, но и расширенные возможности проведения комплексных научных исследований с заинтересованными организациями и учреждениями с последующей коммерциализацией полученных результатов в реальном секторе экономики.

Главным препятствием на пути успешной реализации предлагаемой концептуальной модели «Университет 3.0» видится отсутствие в настоящее время должного взаимодействия между вузами, бизнес-структурами, научными организациями и государственными институтами. Множество существующих в настоящее время форм взаимодействия указанных экономических субъектов можно объединить в четыре группы: 1) партнерские связи «предприятие – вуз», развиваемые на долгосрочной основе (организация стажировок студентов на предприятиях, участие специалистов-практиков в учебном процессе, выполнение совместных проектов в рамках совместных лабораторий); 2) модель факультативных групп – создание крупными корпорациями факультативных групп на базе высших учебных заведений. Студенты обучаются по особым программам, регулярно проходят стажировки в ведущих национальных корпорациях. По завершении обучения студенты обладают всеми необходимыми компетенциями для работы в той или иной корпорации; 3) программы совместной подготовки – взаимодействие учебного заведения и промышленности на этапе организации учебного процесса (например, Международная инженерная программа Университета Род-Айленда, Центра профессионального образования концерна Siemens); 4) обучение на предприятии. Данная форма характеризуется как образовательный процесс, сочетающий практическое обучение с частичной занятостью на производстве и обучение в традиционном учебном заведении; 5) профессионально-консультативные комиссии, формируемые из представителей реального сектора экономики, учебных заведений, государственных органов образования, местных администраций. Областью деятельности профессионально-консультативных комиссий является разработка учебных программ по различным специальностям [2].

Следует отметить и формы интеграции науки, высшего образования и производства, существовавшие и доказавшие свою эффективность в республиках бывшего СССР. Например, система ГЭМИКШ исходила из необходимости подготовки инженеров для конкретных потребностей промышленности и техники. Студент рассматривался как полноценный участник производствен-

ного процесса: четыре дня в неделю студенты работали на заводах, а в течение двух дней по 10 часов занимались в институте. При этом студенты не только участвовали в создании материальных благ, но и полностью окупали свое содержание. На выходе получался опытный специалист, который не тратил время на освоение производства с нуля [3]. Но в системе не было места науке. Как известно, наиболее эффективным средством преодоления противоречия между массовым характером подготовки специалистов в вузе и потребностями развития самостоятельности, инициативы, формирования креативного мышления у студентов является привлечение студентов к выполнению научных исследований.

Именно в высших учебных заведениях возможно объединение научных исследований независимо от ведомственных границ, то есть интеграция научных знаний при решении комплексных проблем. В отличие от научно-технических центров, созданных на базе крупных предприятий промышленного сектора экономики, университеты могут проводить фундаментальные исследования и при наличии собственной материально-технической базы незамедлительно использовать результаты фундаментальных исследований в прикладных, а также внедрять свои разработки в производственный процесс. Это создает резервы сокращения времени подготовки к решению принципиально новых практических проблем, внедрению полученных результатов в производственный процесс, а также снижению стоимости разработок и конечного продукта.

Однако наблюдающееся несоответствие между огромным научным потенциалом высшей школы, большой концентрацией научно-педагогических кадров, возможностью развивать фундаментальные и прикладные исследования и состоянием материально-технической базы тормозит раскрытие всех преимуществ вузовской науки. Одним из возможных вариантов ликвидации данного несоответствия может стать вступление вузов в создаваемые инновационно-промышленные кластеры.

Как известно, любой кластер является инновационным по своей сути, так как включает в себя всю инновационную цепочку от генерации научных знаний, формирования бизнес-идей до реализации новой продукции на новых или традиционных рынках сбыта. Инновационный процесс в рамках кластера описывается концепцией «тройной спирали». «Тройная спираль» – это нелинейная, нестатичная модель, которая описывает частично перекрывающиеся друг друга и меняющиеся роли основных субъектов инновационного процесса: университеты становятся предпринимателями за счет создания на своих площадках бизнес-инкубаторов; организации реального сектора становятся организаторами



собственных образовательных структур и центров знаний, проведения научных исследований для своих нужд, а государство становится венчурным капиталистом в силу необходимости поддерживать инновационные инициативы и предоставлять финансовую поддержку отдельным проектам. Таким образом, «спиралевидность» данной модели определяется тем, что три ключевых субъекта инновационного развития в рамках кластера постоянно меняются ролями, частично замещая друг друга, параллельно продолжая выполнять свои традиционные функции.

Еще большему раскрытию сетевых взаимодействий внутри кластера способствуют технологические платформы. Как объект индустриально-инновационной инфраструктуры технологические платформы обеспечивают производственную и научно-техническую кооперацию, способствуют созданию центров компетенций, повышению уровня конкурентоспособности как отдельного продукта, так и национальной экономики в целом. При этом кластеры и технологические платформы могут существовать как межгосударственные объединения, способствующие мобильности капитала и рабочей силы, трансферу знаний и технологий. Формирование межгосударственных кластеров и технологических платформ в условиях острой международной конкуренции становится стратегическим фактором устойчивости национальных экономик. Вхождение университетов в данные образования

будет способствовать формированию профессиональных компетенций будущих специалистов еще на этапе обучения, профессиональному обоснованию учебных планов и учебных программ, активному продвижению научных проектов и инициатив, а также повышению уровня финансовой независимости вузов, престижа науки и научного сотрудника, уровня использования образовательного потенциала нации. При этом конечные цели вузов, представителей бизнеса и государства совпадают.

#### Литература

1. Концептуальные подходы к развитию системы образования Республики Беларусь до 2020 года и на перспективу до 2030: Приказ Министра образования Респ. Беларусь, 29 нояб. 2017 г., №742 // Мин-во образования Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: [edu.gov.by/sistema.../respublikanskyi...-/4%20Концептуальные%20подходы%202020](http://edu.gov.by/sistema.../respublikanskyi...-/4%20Концептуальные%20подходы%202020). – Дата доступа: 07.09.2018

2. Степаненкова, Т.В. Разработка сбалансированной модели взаимодействия системы образования и рынка труда в регионе (на примере сферы сервиса): автореф. дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / Т.В. Степаненкова; Росс. гос. ун-т туризма и сервиса. – Москва, 2008. – 27с.

3. Малков, А.Г. Оригинальный производственный институт / А.Г. Малков // ЭКО. – 1983. – № 3. – С. 163–189.

УДК 004.89

### ЦИФРОВИЗАЦИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА СТРАНЫ Серченя Т.И., Завацкая Д.С., Данилевич Е.Д.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Цифровая модификация, диджитализация (переход всех типов данных в числовую форму), искусственный интеллект, машинное изучение, роботизация – все это стремительными темпами захватывает современное общество. Доля цифровой экономики в ВВП развитых стран с 2010 по 2016 год выросла с 4,3 % до 5,5 %, а в ВВП развивающихся стран – с 3,6 % до 4,9 %. Мировым лидером по доле цифровой экономики в ВВП является Великобритания – 12,4 %. По прогнозам консалтинговой компании Accenture, использование цифровых технологий должно добавить в 2020 году 1,36 трлн долларов США, или 2,3 % ВВП в общем объеме ВВП десятки ведущих мировых экономик. ВВП развитых стран подрастет за счет «цифровой экономики» на 1,8 %, а ВВП развивающихся стран – на 3,4 % [1].

Цифровая трансформация экономики обозначена как приоритетное направление развития экономики и Республики Беларусь. Для реализации данного направления 21 декабря 2017 года

Президентом Республики Беларусь был подписан Декрет № 8 «О развитии цифровой экономики» [2]. Кроме того, Декрет направлен на развитие инновационной сферы и Парка высоких технологий. Так, в соответствие с данным Указом резиденты Парка высоких технологий получили право на осуществление деятельности в сфере искусственного интеллекта, создания систем беспилотного управления транспортными средствами.

Искусственный интеллект лежит в основе Четвертой промышленной революции. Сквозные технологии цифровой экономики, к которым относят нейротехнологии, искусственный интеллект, системы распределенного реестра (блокчейн), фотонные технологические процессы, робототехнику, сенсорику, беспроводную связь, способны привести к технологическому прорыву сразу в нескольких отраслях, резко повысив экономическую устойчивость страны [3].

Искусственный интеллект как термин не имеет единого определения и может использоваться

в разных контекстах. Чаще всего искусственный интеллект определяется как область компьютерной науки, занимающейся автоматизацией разумного поведения. Основные свойства искусственного интеллекта – способность мыслить и действовать, способность к обучению [4]. Разработки в области искусственного интеллекта ведутся давно, но значимые результаты промышленного внедрения появились только в середине 2010-х годов. Обусловлено это следующими факторами: 1) развитие технологий глубокого обучения – обучения в процессе применения множества сходных задач; 2) лавинообразный рост данных разного типа и технологий, позволяющих хранить эти данные и получать доступ к ним.

До настоящего времени одним из значимых направлений развития искусственного интеллекта считается разработка роботов (создание интеллектуальных роботов, способных автономно совершать операции по достижению целей, поставленных человеком). Робот рассматривался как технический комплекс, реализованный с целью исполнения всевозможных перемещений и отдельных интеллектуальных функций человека и владеющий нужными для этого исполнительными приспособлениями, управляющими и информационными системами, а кроме того средствами решения вычислительно-законо-мерных задач.

На данный момент выделяют 3 поколения развития роботов: 1) программные. Существует жестко установленный план (циклограмма); 2) адаптивные. Возможность автоматически перепрограммироваться (приспосабливаться) по ситуации. Первоначально задаются только основные принципы плана действий; 3) интеллектуальные. Задание вводится в единой форме, а непосредственно робот обладает возможностью осуществлять постановки либо составлять план собственных действий в распознаваемой им неопределенной либо непростой ситуации [5]. Для обучения мобильных роботов используются технологии глубокого обучения. Находят применение данные технологии и при решении задач компьютерного зрения, необходимого в создании беспилотных автомобилей, дронов, робототехнических устройств.

В настоящее время искусственный интеллект вводится и в традиционные сферы экономики, такие как промышленность и сельское хозяйство. Эксперты полагают, что в указанных секторах экономики изначально основная доля прибыли от применения искусственного интеллекта будет поступать за счет усовершенствования сервиса покупателей. Затем уже за счет автоматизации умственного труда, увеличения производительности бизнес-процессов. Помимо этого, технологии искусственного интеллекта позволяют повысить производительность действующего оборудования на 5–10 % без существенных инвестиций

в производство. А также учитывая тот факт, что современное производство – это сложный программно-технический комплекс, где поломка одного звена способна парализовать работу всей системы, применение технологии искусственного интеллекта повышает промышленную безопасность и положительно сказывается на показателях общей экономической эффективности.

В сельском хозяйстве набирают обороты технологии машинного обучения. Так, в 2016 году российская компания Cognitive Technologies протестировала беспилотный трактор с системой компьютерного зрения. И в этом же году компания CNH Industrial представила концепт беспилотного трактора на основе существующего Case IH Magnum. Трактор может работать без участия водителя, используя лидар (*технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью систем, использующих явления отражения света и его рассеяния*). По результатам проведенных испытаний беспилотные транспортные средства способны повысить точность и продуктивность работ в секторе сельского хозяйства [6].

Искусственный интеллект также находит применение в системах мониторинга, где есть потребность максимально оперативно собрать и обработать большие массивы информации, необходимой для построения различных информационных моделей. Технологии искусственного интеллекта используются и для решения экологических задач – изменение климата, биоразнообразия и его сохранение, поддержание мирового океана в здоровом состоянии, обеспечение водной безопасности, сохранение чистого воздуха, погодостойчивость и устойчивость к стихийным бедствиям. Вместе с тем бездумное использование технологий искусственного интеллекта может ускорить разрушение окружающей среды. Поэтому государство должно обеспечить надлежащий контроль и прозрачность технологий искусственного интеллекта, чтобы минимизировать возможные риски.

В ближайшее время ожидается подъём развития узких технологий искусственного интеллекта, которые помогут решать какие-то довольно простые задачи, но их они будут решать даже лучше, чем человек. Система распознавания голоса, к примеру, уже сейчас распознает определённые голосовые команды и адреса лучше, нежели человек.

Сейчас очевидно, что создание и применение в вышеперечисленных областях технологии искусственного интеллекта качественно улучшит жизнь и поможет при решении многих социальных проблем.

Но на данный момент существует ряд факторов, которые могут осложнить широкое распространение данной технологии. В основном,

затруднения может вызвать следующее: отсутствие высококвалифицированного персонала и необходимой инфраструктуры. Разрешение проблем применения технологий искусственного интеллекта будет возможным с ростом их востребованности, так как новая технология будет внедрена во все сферы деятельности и специалистов в данной сфере станет намного больше.

### Литература

1. Главные цифровые экономики мира: в авангарде цифровой экономики // годовой отчет государственной корпорации «Ростех» за 2016 год [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://ar2016.rostec.ru/digital-g20/>.

2. О развитии цифровой экономики: Декрет Президента Республики Беларусь №8 от 21.12.2017 г. [Электронный ресурс] / Национальный центр правовой информации Республики

Беларусь. – Минск, 2017. – Режим доступа: <http://ncpi.gov.by/>.

3. Сквозные технологии цифровой экономики [Электронный ресурс] / datascientist – Наука о данных. – Режим доступа: <http://datascientist.one/skvoznye-techologii-digital-economy/>.

4. Архитектура интеллектуальных роботов [Электронный ресурс] / КиберПедия – информационный ресурс. – Режим доступа: <https://cyberpedia.su/8xf6e3.html>.

5. Цветкова, Л.А. Технологии искусственного интеллекта как фактор цифровизации экономики России и мира / Л.А. Цветкова // Экономические науки. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 126-144.

6. Карта применения технологий искусственного интеллекта: медицина, образование, транспорт и другие сферы // Проект: бизнес и технологии [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://vc.ru/future/18790-ai-map>.

УДК 334.75

## ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ Серченя Т.И., Лящук О.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В современных условиях стремительно меняется рыночная среда, и перед предприятиями встает проблема устойчивости и востребованности при изменении рыночной конъюнктуры. Для повышения стойкости организации создаются объединения различной формы.

Как известно, первые предпринимательские объединения появились в промышленно развитых странах несколько веков назад. Объединение предприятий – добровольная ассоциация организаций для достижения общих целей. Комбинация между организациями может быть временной или постоянной, а также сформирована по письменному соглашению или устно. Основная цель объединения – исключить конкуренцию и обеспечить преимущества крупномасштабного производства. Участниками объединения предприятий может выступать любой хозяйствующий субъект: индивидуальный предприниматель, организация и предпринимательское объединение и т. д. В зависимости от отраслевой принадлежности объединения делятся на отраслевые (инновационные, страховые) и межотраслевые (банковская и нефтегазовая деятельность и другие). Также объединения классифицируются в зависимости от целей, для которых были созданы. В связи с этим можно выделить объединения: созданные для получения максимальной прибыли; созданные для получения экономического превосходства на рынке созданные для повышения конкурентоспособности субъектов; созданные для продвижения определенной продукции (товара, работ и услуг) на соответствующем рынке.

В зарубежной практике встречаются следующие способы объединения предприятий:

### 1. Вертикальная комбинация.

Это объединение, при котором различные отделы крупных промышленных предприятий объединяются под единым управлением. Ключевыми целями вертикальной комбинации являются:

- минимизация стоимости единицы продукции;
- устранение конкуренции;
- привлечение экспертов;
- совершенствование методов производства;
- сокращение комиссии посредника;
- получение максимальной прибыли;

### 2. Горизонтальная комбинация (добровольная комбинация).

Это объединение двух или более предприятий одного и того же характера под одним руководством. Оба предприятия, участвующие в объединении, занимаются одной и той же деятельностью, и поэтому их комбинация называется горизонтальной комбинацией. Основные цели этой бизнес-комбинации такие же, как и для вертикальной комбинации.

### 3. Циклическая комбинация.

Этот тип объединения включает в себя различные организации, объединяющие себя под единым руководством. Основной целью этой выгоды является обеспечение преимуществ административных способностей путем совместного управления.

### 4. Диагональная комбинация.

Диагональное объединение бизнеса включает в себя два или более субъектов бизнеса, выпол-

няющих вспомогательные услуги, объединяющие себя под единым руководством. Основная цель этого объединения – сделать бизнес-блок большим и самодостаточным.

В Республике Беларусь распространены такие виды объединений, как холдинги, консорциумы, ассоциации, синдикаты, финансово-промышленные группы, концерны.

Холдинги не производят товары или услуги; скорее, их целью является владение акциями других компаний для формирования корпоративной группы.

Основным преимуществом холдингов является то, что холдинг защищен от убытков. Например, если компания вступает в банкротство, другие компании под эгидой основного холдинга защищены от требований кредитора. Организация размещения обычно встречается в крупных корпорациях, которые инвестируются в бизнес из нескольких отраслей. Наиболее масштабными холдингами в Республике Беларусь являются ОАО «Интеграл», «Горизонт», «Белкоммунмаш», «АМКОДОР».

Консорциум подразумевает объединение двух или более организаций или предприятий (или любой комбинации этих лиц) с целью участия в совместной деятельности и объединяющие свои кадры, мощности, финансовые и материальные ресурсы для достижения общей цели. Недостатком данной формы объединения является то, что она носит временный характер и прекращает деятельность после выполнения поставленной задачи. Наиболее ярким примером является консорциум «Евразийская сельскохозяйственная технологическая платформа»

Ассоциации – объединения коммерческих организаций для координации их предпринимательской деятельности, а также защиты имущественных интересов. Ассоциация может координировать общие разработки и исследования, предоставлять участникам информационные и юридические услуги, помогать в поиске рынков.

Зачастую предприятия, выпускающую однородную продукцию, объединяются в синдикаты. При данной форме объединения предприятия сохраняют самостоятельность в отношении производства продукции, однако заключают соглашение по контролю над закупкой сырья и сбытом товаров для получения монопольной прибыли.

Финансово-промышленная группа – это совокупность хозяйствующих субъектов в форме корпоративного образования, в состав которой входит финансовая структура, такая как банк или кредитное учреждение. Данная форма объединения представляет интерес как для банков, так и для предприятий: банки наращивают клиентскую базу, расширяют спектр финансовых услуг и повышают уровень кредитоспособности, а предприятия получают независимость от внешней

среды, ускорение оборачиваемости средств, значительно снижают средства на приобретение материалов. Основными проблемами при функционировании данных групп является дефицит финансирования, низкая активность центральной компании, усиление монополизации.

Концерн является долговременной формой объединения предприятий и состоит из контролируемых предприятий и одного предприятия, выполняющего контроль над остальными. Предприятия, входящие в состав концерна, могут находиться в разных городах или странах. Управленческое предприятие осуществляет контроль в сфере маркетинга, снабжения, а также финансовый контроль по отношению к объединенным предприятиям. Основным недостатком данной формы объединения является ограниченная самостоятельность участников. Однако концерны отличаются высоким уровнем кооперирования производства, единой собственностью участников, единой централизованной системой контроля. Примерами концернов являются такие предприятия как Беллегпром, Беллеспром, Белгоспищепром.

Для организации комбинированного производства предприятия объединяются в тресты. Данная форма подразумевает слияние всех предприятий в единый комплекс, который находится под руководством центральной управляющей компании. При вхождении в трест предприятия теряют производственную самостоятельность, а прибыль распределяется в соответствии с долевым участием организаций. Объединения в форме трестов предпочитают организации строительной индустрии.

Одним из преимуществ объединений является снижение конкуренции между компаниями, что приводит к увеличению прибыли и позволяет получить монополию на рынке. Следующее преимущество – это увеличение капитала, которое способствует выходу продукции на новые рынки, а также помогает разрабатывать новые продукты. Уменьшается стоимость управления и создания компании. Покупка материалов становится выгоднее. Из-за добавочного капитала, материалы или акции могут быть куплены оптом, и, следовательно, по лучшей цене. Как правило, это помогает обеспечить более стабильную цену на товары на рынке.

Разделение труда также играет большую роль при объединении предприятий. Разделение работ между директорами, менеджерами и рабочими увеличивает продуктивность и эффективность работы предприятия.

Главным недостатком объединения предприятий для потребителей является завышение цен в следствие монополии на рынке: у потребителей не остается выбора, кроме как покупать искусственные дорогостоящие товары.

Недостатками для предприятия может являться увеличение в разы больше, чем этого тре-

бует предприятие. В итоге неиспользованный капитал приводит к истощению ресурсов, затем происходит снижение стоимости ценных бумаг, падение прибыли, что отрицательно сказывается на кредитной репутации предприятий и объединения в целом.

Еще одним недостатком является потеря индивидуальности и репутации компании при вхождении в состав одной из форм объединения предприятий. Это может оказать влияние на сотрудников, которые теряют чувство своей идентичности, как части компании.

Следует сделать вывод, что только всестороннее понимание необходимости объединения

с учетом позиций всех участников процесса и потребностей работников может привести к успешной практической реализации таких проектов.

#### Литература

1. Интегрированные структуры / М-во экономики Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Минск, 2017. – Режим доступа : [http://www.economy.gov.by/ru/integrirrovannye\\_struktury-ru](http://www.economy.gov.by/ru/integrirrovannye_struktury-ru) . – Дата доступа 09.09.2018.
2. Лаптев, В.А. Предпринимательские объединения: холдинги, финансово-промышленные группы, простые товарищества / В.А. Лаптев. – М. : Волтерс Клувер, 2008. – 192 с.

УДК 336

### ПОНЯТИЕ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

Гурина Е.В., Скурковина М.М.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Определение финансового результата деятельности предприятия является одной из главных общеэкономических и бухгалтерских научно-практических проблем, которая особенно обострилась в условиях перехода к рыночной экономике.

В процессе осуществления хозяйственной деятельности задействовано большое количество взаимосвязанных материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Цель любого предприятия – это получение положительного финансового результата и поиск путей его увеличения, а результативность его деятельности отражается в финансово-экономических показателях, которые наиболее точно характеризуют финансовое состояние и дают представление об экономическом потенциале его развития.

Финансовый результат – это прибыль или убыток, который получает хозяйствующий субъект, вследствие своей деятельности [1]. Для определения финансового результата предприятия сравнивают доходы отчетного периода с расходами, которые были осуществлены для получения этих доходов. Формирование финансового результата отчетного года производят на счете 99 «Прибыли и убытки». По состоянию на 1 января отчетного года счет начального сальдо не имеет (имеет нулевое сальдо).

Это означает, что по окончании отчетного года после определения финансового результата производят реформацию баланса, именно сальдо переносят на счет 84 «Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)» и счет 99 закрывают. Счет 99 предназначен для обобщения информации о формировании конечного финансового результата деятельности организации в отчетном периоде (месяц, квартал, год). На счете 99 в течение отчетного года отражают:

– прибыль или убыток от основных видов деятельности – в корреспонденции с дебетом (или кредитом) счета 90 «Реализация»;

– сальдо операционных доходов и расходов за отчетный месяц – в корреспонденции с дебетом (или кредитом) счета 91 «Операционные доходы и расходы»;

– сальдо внереализационных доходов и расходов за отчетный месяц – в корреспонденции с дебетом (или кредитом) счета 92 «Внереализационные доходы и расходы»;

– начисленные налоги и сборы из прибыли: налог на прибыль, налог на недвижимость и иные налоги и сборы из прибыли, исчисленные в соответствии с законодательством, а также суммы причитающихся налоговых и неналоговых санкций и пени (за исключением санкций и пени за неисполнение или ненадлежащее исполнение хозяйственных договоров) – в корреспонденции с кредитом счетов 68 «Расчеты по налогам и сборам» и 69 «Расчеты по социальному страхованию и обеспечению».

По окончании отчетного периода (месяца, квартала, года) при составлении бухгалтерской отчетности счет 99 закрывают. При этом заключительной записью последнего месяца отчетного периода сумму чистой прибыли (убытка) отражают по дебету (кредиту) счета 99 и кредиту (дебету) счета 84.

Одним из немаловажных аспектов организации аналитического учета финансовых результатов на предприятии является их обоснованная классификация.

Величина финансового результата, является базисом, который обеспечивает не только жизнеспособность предприятия, но и отражает уровень результативности, прибыльности хозяйственной деятельности, возможности количественного ро-

ста основных экономических показателей и характеризует потенциал устойчивого развития предприятия [2]. На сегодняшний день существует два принципиальных подхода к расчету финансовых результатов предприятия, которые имеют некоторые модификации в разных странах мира:

– метод сравнения доходов и расходов (метод «затраты-выпуск») – предполагает определение прибыли (убытка) по принципу начисления и соответствия доходов и расходов, то есть как разница между доходами и расходами отчетного периода.

– метод сравнения капитала (или метод изменения чистых активов) – предусматривает определение прироста собственного капитала в отчетном периоде как разницы между суммой собственного капитала на конец и на начало отчетного периода, то есть рассчитывается разница. То есть если собственный капитал на конец отчетного периода увеличивается, то предприятие получает прибыль, а если наоборот – ущерб [3].

Финансовый результат представляет собой сложную экономическую категорию, что требует более углубленного изучения сущности, роли,

особенностей формирования, распределения, использования финансового результата и их влияния на хозяйственную деятельность предприятия, поэтому нуждаются в дальнейших глубоких исследований.

#### Литература

1. Базилинская О.Я. Финансовый учет: теория та практика : [науч. пособ.] / О.Я. Базилинская ; 2-ге вид. – К. : Центр учебной литературы, 2011. – 398 с.

2. Кондакова Н.В. Сущность и значение финансовых результатов в системе розвития хозяйственной деятельности промышленных предприятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.gb.by/izdaniya/glavnyi-bukhgalter/kondakova-n-uchet-finansovogo-rezultata\\_0000000](https://www.gb.by/izdaniya/glavnyi-bukhgalter/kondakova-n-uchet-finansovogo-rezultata_0000000);

3. Дубинина М.В. Напрямы формирования качественной информационной базы, относительно финансовых результатов аграрных предприятий / М.В. Дубинина // Финансовый простор. – 2014. – № 3(15). – С. 78–81.

УДК 338.5

### СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ЦЕНООБРАЗОВАНИЮ

Гурина Е.В., Сологуб А.А., Рубан А.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В условиях формирования инновационно восприимчивой Национальной экономики большое значение для субъектов хозяйствования имеет выявление конкурентных сил на соответствующих рынках. К основным конкурентным силам большинство специалистов по маркетингу инноваций относят: внутриотраслевых конкурентов, поставщиков производственных запасов, потребителей, производителей товаров-заменителей и сопутствующих товаров, новых конкурентов. При всём разнообразии всех участников рынка основным фактором, который формирует конкурентные преимущества, бесспорно, является цена товара. Известно, что все применяемые в отечественной практике ценообразования методики основываются в той или иной степени на учёте затрат (издержек) производства на выпуск продукции. Это – затратный метод, где прибыль равняется нулю, т. е. производитель не достигает точки безубыточности; доходный метод, где вместе с производственными издержками по нормативу рентабельности определяется прибыль; метод договорной цены по которой продавец готов продать, а покупатель – купить товар. Однако при использовании любых методов ценообразования не доказана природа возникновения прибыли – основного элемента цены и основной цели коммерческой деятельности.

В настоящее время все большего внимания заслуживает методология ценообразования, созданная и распространенная австрийской школой экономики, базой которой служит постулат, что ценообразование формируется по принципу теории «предельной полезности». Появилась австрийская школа экономики в 80-х годах 20 века в Австрии. Существенное место в формировании австрийской школы занимали английские экономисты В. Джевонс, А. Маршалл, швейцарский экономист Л. Вальрас и др. Методологическая основа австрийской школы теоретически-дедуктивный способ изучения политической экономии, который основывается на отвлечении от усложняющих факторов. Основатели этой школы полагали, что покупателем руководит только лишь эгоизм, а все другие факторы второстепенны.

Австрийская школа отвергала издержки в целом и трудовые затраты в частности, которые являются объективной почвой ценообразования. Представители этой школы принимали за основу цены индивидуальную полезность «последнего экземпляра», удовлетворяющего минимально настоятельную или же предельную необходимость в установленном товаре. В свою очередь значимость приобретаемого блага находится в зависимости от соответствия его запаса и необходимостей в нем. То есть с увеличением запаса значимость блага уменьшается, а с сокраще-

нием запаса – увеличивается. Следовательно, значимость блага находится в зависимости от насыщенности потребности в нем.

Чтобы лучше разобраться в той теме, необходимо хорошо понимать разницу между объективной и субъективной полезностью. Объективной полезностью является возможность служить для удовлетворения человеческих потребностей. Субъективная ценность – это значимость вещи для благополучия конкретного человека. Значит, одна и та же вещь может обладать разной значимостью для разных людей, но при том одинаковой ценностью. Чтобы была сформирована ценность нужна полезность, объединенная с редкостью товара по сравнению с потребностью. Такую редкость еще можно называть относительной. Таким образом, блага обладают ценностью лишь в том случае, если их не хватает на рынке. Следовательно, К. Менгер одним из самых первых разработал теорию предельной полезности, стараясь показать взаимосвязь полезности и редкости товаров для потребления. Потребности людей он изучал как не до конца удовлетворенные желания или в некоторых случаях даже неприятные ощущения, нарушающие физиологическое и психологическое равновесие конкретного человека. К. Менгер озвучил принцип, который назвал «убывающей полезностью».

А вот В. Визер считал, что затраты, которые возникают в ходе производства товаров являются полезностью, а ценность товаров является ценностью издержек производства. Подчиняясь концепции факторов производства, он доносил мысль, что труд, как и иные факторы, которые могут быть заложены в стоимость предметов потребления не служит создателем таковой стоимости. Так как есть вечное противостояние потребностей и ограниченных запасов, которые необходимы для их удовлетворения, значит есть и способность людей ценить предметы и желание владеть ими. Обмениваться могут только те полезности, количество которых настолько ограничено, что делает из них настоящие ценности.

Самым популярным среди основателей австрийской школы был Е. Бем-Баверк, который считал, что термин «ценность» показывает взаимосвязь цены и психологической оценки конкретным человеком. Но в то же время, он уделял достаточно внимания и объективной ценности, так как она появляется в ходе колебания спроса и предложения. Для любого фактора производства Е. Бем-Баверк утверждал, что должна отводиться конкретная доля потребительских благ. Но доход рабочего в таком случае должен быть меньше относительно созданной им ценности. Это может быть связано с тем, что он готов покупать необходимые для него блага, а ценность таких благ больше ценности тех, которые будут созданы в процессе производства.

К достоинствам австрийской школы относятся следующие:

- желание вычислить ценность продукта степенью его полезного эффекта;
- идея учета редкости товара при измерении его стоимости;
- абстрактная полезность (полезность каких-то благ, которая не зависела от количества их запаса) и реальная полезность (полезность определенного блага, которая по мере насыщения потребителем для любой следующей единицы будет меньше предыдущей);
- учёт некоторого влияния на цену благ колебаний спроса и предложения при удовлетворении определенной потребности в этом товаре;
- определение такого понятия, как «предельная полезность», ее величина, введена в экономическую теорию основ маргинального анализа;
- показано очевидное влияние субъективной оценки отдельных людей на образование цен.

Но ученые австрийской школы не смогли объяснить, такой факт, что одни из самых полезных веществ (вода, воздух и т. д.) в современном мире не имеют цены, почему средние цены благ значительно отличаются, как ценность продукта может быть ограничена отдельным фактором производства, как соединить полезность и затраты, необходимые для производства благ, или результаты и затраты. Вызывал споры также и тезис о полнейшей зависимости ценности от субъективной полезности. Были попытки разъяснить процесс образования цен только психологической оценкой благ конкретными людьми. Это основано на том, что такие оценки многих индивидов во всех случаях совершенно разные и часто даже противоположны. Однако полезность благ служит базой для определения стоимости, а степень полезности ни в каком случае не может служить мерой стоимости.

К минусам австрийской школы, а именно школы К. Менгера, можно отнести тот факт, что уравнивание предельной полезности существует лишь в условиях уже сложившейся цены, а также дохода потребителя. Это ставит под сомнение тезис определения цены различных благ путем субъективного оценивания, зависящего, в свою очередь, также от цен. Знаменитый экономист М. Кларк не без оснований подвергал критике данную теорию за ее очевидную тавтологичность. Кроме того, при таком огромном количестве оценок, которые являются субъективными, в этой теории нет объективной единицы, которая могла бы их измерить. На основе этого Е. Бем-Баверк говорил об равенстве ценности запаса и сумме полезностей, а Визер определял такую ценность умножением предельной полезности на число экземпляров определенного запаса. Австрийскую школу обвиняют в несоответствии теории и практики ценообразования. Причины,

которыми австрийская школа объясняет появление частной собственности, не соответствуют практике исторической действительности и могут быть определены только одним из множества других факторов. Очень уж уязвимым является тезис этой школы о превосходстве потребления над производством, который выходит из теории распределения. Современники австрийской школы следят за рыночными процессами и ценами. Хайек пользовался теорией долгосрочного равновесия Бем-Баверка для того, чтобы понимать цикл, изменения производства прямо пропорционально реальной заработной плате и обратно пропорционально ставке процента. Исходя из этого, можно увидеть сокращение заработной платы во время подъема и рост во время спада.

На наш взгляд к основным недостаткам методологически подходов к ценообразованию Австрийской экономической школы можно отнести следующие.

1. Затраты труда, которые предлагается игнорировать, являются основными при создании стоимости товаров, так как именно этот фактор производства позволяет соединить орудия и предметы труда для получения добавочного продукта, часть которого и формирует прибыль. Таким образом классическими структурными элементами цены являются издержки производства (затраты на производство и реализацию продукции) и прибыль.

2. Полное игнорирование затрат просто невозможно, так как ни один предприниматель не ста-

нет заниматься бизнесом не сопоставляя свои желания со своими возможностями. Так или иначе он ориентируется на свои прошлые затраты при производстве идентичной продукции или на соотношение затрат и прибыли у конкурентов.

3. Игнорирование затрат труда или их недоучёт в конечном итоге сводит на нет понятие цены рабочей силы, что связано со значительными рисками повышения благосостояния населения.

4. Упор при ценообразовании только на полезность и доступность товара поднимает на незаслуженную цену такой приём психологического воздействия на потребителя как позиционирование какого-либо блага, когда происходит порой даже агрессивное воздействие на его психику, путём внушения, что без данного блага жизнь невозможна. В конечном итоге это может способствовать формированию монопольной прибыли, полученной недобросовестным образом.

#### Литература

1. Австрийская школа в политической экономии: К. Менгер, Е. Бём-Баверк, Ф. Визер: пер. с нем. / Предисл., коммент., сост. В.С. Автономова. – М. : Экономика, 1992.– (Экон. наследие.). ISBN 5-282-01471-8.

2. Мизес Л. Теория и история: Интерпретация социально-экономической эволюции. – М. : Юнити-Дана, 2001. – 295 с.

3. Хайек Ф. Индивидуализм и экономический порядок. – М. : Изограф, 2000. – 256 с.

УДК 388.46

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ МАРКЕТИНГА КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Третьякова Е.С.<sup>1</sup>, Третьяков-Савич Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Каунасский технологический университет, Каунас, Литовская Республика

В современных экономических условиях необходимым фактором повышения результативности деятельности предприятий является эффективное управление маркетинговой деятельностью, которое основывается на ряде концептуальных подходов.

Концепции маркетинга можно охарактеризовать как основные позиции, обеспечивающие условия для успешного функционирования любой организации.

Традиционная маркетинговая деятельность опирается на три основные составляющие, такие как планирование (нацеленное на перспективу), управление (исследование продукта, оценка его реализации, анализ ценовой политики, прогнозирование и т. д.) и ориентация действий предприятий в первую очередь на удовлетворение нужд и запросов целевых потребителей.

Предприятия используют различные концепции маркетинга.

Концепция совершенствования производства – основной упор делается на то, что потребители интересуют в первую очередь товары, которые широко распространены и доступны по цене, поэтому предприятия должны сосредоточить усилия на совершенствовании производства и снижении цен на выпускаемую продукцию.

Концепция совершенствования продукта, ее основная идея – потребители заинтересованы в товарах, обладающих высокими качествами и лучшими эксплуатационными характеристиками, то есть в центре внимания данной концепции находится именно товар.

Концепция интенсификации коммерческих усилий – получение прибыли за счет увеличения объема реализованной продукции, а это в первую



очередь достигается за счет массовой рекламы и инструментов стимулирования сбыта. Данная концепция чаще всего используется в периоды перепроизводства, ее основная задача – реализация уже произведенной продукции.

В концепции чистого маркетинга основной упор дается на ориентацию только на потребителей, то есть необходимо создавать только те продукты, которые будут востребованы покупателями.

Концепция общего маркетинга, в современных условиях трансформируется в Marketing Mix, который основывается на следующих группах переменных факторов (базовые элементы «4P»), которые условно обозначаются терминами «товар, продукт» (Product), «цена» (Price), «методы и места продажи товаров» (Place), «методы стимулирования, продвижение» (Promotion). Несколько позже появилась модель 5P (4P's+People), а далее в связи с развитием рынка услуг стала активно использоваться модель 7P (5P's+Process+Physical Evidence). В современных условиях используются также и концепция «4C», в которой основной упор делается не столько на продукт и его производство, сколько на самого потребителя и получаемые им выгоды [3, с. 189].

Концепция стратегического маркетинга направлена на долгосрочную перспективу, вследствие чего необходимым условием успешной деятельности предприятий является проведение такой политики создания продукции, которая обеспечивают потребителей товарами более высокой потребительной ценности, чем аналогичные продукты у конкурентов.

Концепция социально-этичного маркетинга предполагает достижение основной цели производства с учетом интересов общества и защиты окружающей среды.

Концепция холистического (целостного) маркетинга основана на планировании, разработке и внедрении маркетинговых программ, процессов и мероприятий с учетом их широты и взаимозависимости, то есть используется расширенный, интегрированный подход. Ее можно охарактеризовать как концепцию, интегрирующую в себе все элементы взаимодействия предприятия с клиентами, поставщиками и посредниками. Данная система позволяет постоянно расширять представления о потребностях потребителя, осуществлять поиск новых способов обслуживания с учетом ценностей целевой аудитории, а также оценить вклад каждого сотрудника и подразделения компании в реализацию политики предприятия.

В концепцию холистического маркетинга включают четыре категории маркетинга: внутренний, интегрированный, социально ответственный и маркетинг взаимоотношений, что обеспечивает реальные результаты деятельности предприятий.

Таким образом, современные концепции маркетинга состоят в том, чтобы вся деятельность предприятий (научно-техническая, производственная, сбытовая и т. д.) основывалась на знании потребительского спроса и его изменений в перспективе. Необходимо учитывать, что одна из задач маркетинга заключается в выявлении неудовлетворенных запросов покупателей, и вследствие этого, ориентация производства на удовлетворение этих запросов. Маркетинг означает разработку, производство и сбыт того, на что действительно есть потребительский спрос [1, с. 51].

В современных тенденциях и концепциях маркетинга при принятии хозяйственных решений происходит смещение акцента от производственных звеньев в сторону отделов, занимающихся изучением и анализом конъюнктуры, исследованиями рынков. Далее принимается решение о производстве того или иного продукта, его необходимости, перспективности, прибыльности производства. Таким образом, маркетинговые службы являются источником информации и рекомендаций для производственной, научно-технической и финансовой политики предприятия.

Следует особо подчеркнуть, что специалистам по маркетингу необходимо выбирать наиболее приемлемые для данного предприятия подходы, основываясь на специфике предлагаемого продукта, особенностях рынка, потребителей и т. д. [2, с. 129]. Таким образом, успех деятельности современной организации в современных условиях во многом зависят от эффективности использования современных маркетинговых концепций.

#### Литература

1. Фещенко, Е.К. Маркетинг: учебное пособие. / Е.К. Фещенко, А.Н. Висленев, В.М. Макаров, А. И Сурыгин – СПб. : Питер, 2015.
2. Демченко А.С., Сезонова О. Особенности концепции «холистического» маркетинга // Маркетинг, 2014. – № 1 (122). – С. 84–90.
3. Герасименко В.В. Маркетинг: учебник. / В.В. Герасименко : учебник. -3-е изд., Москва, Проспект, 2017.

## БЕНЧМАРКИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Гурина Е.В.<sup>1</sup>, Урбанович В.Р.<sup>1</sup>, Агапова А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев,-Украина

В условиях глобализации предприятия переживают немало трудностей, пытаясь быть конкурентоспособными как на национальном, так и на международном уровне. Современным, достаточно эффективны, методом управления бизнесом с целью выявления конкурентных сил и формирования конкурентных преимуществ является бенчмаркинг, который позволяет предприятиям совершенствоваться, взаимодействуя с другими субъектами рынка, выявляя инструменты превосходства, внедряя их в свою деятельность и полнее используя потенциал роста.

По своей сущности бенчмаркинг – это способ узнать, какая наилучшая производительность достигается – будь то в конкретном предприятии – внутриотраслевом конкуренте или совершенно в другой отрасли путём сбора технической (технологической), экономической или управленческой информации. При этом полученная информация позволяет выбрать лучший из исследуемых объектов и определить его как эталон для организации своих бизнес-процессов.

Основные направления получения информации являются методы определения рисков и предотвращения страховых ситуаций, формирование спроса с учётом ёмкости рынка, основные направления инновационной деятельности, а также опыт формирования и оценки инновационно-инвестиционных проектов, процесс и эффективность патентных исследований. Некоторые специалисты определяют бенчмаркинг как непрерывный процесс принятия решений сопоставляя продукцию, услуги и практический опыт по отношению с самыми сильными конкурентами, признанным в качестве промышленных лидеров.

Хотя существует множество форм бенчмаркинга, их можно разделить на три категории – внутренние, конкурентные и стратегические. *Внутренний бенчмаркинг* используется, когда предприятие уже установило и доказало лучшие результаты и ему просто нужно поделиться ими. Внутренний бенчмаркинг также может потребоваться, если сопоставимые отрасли недоступны.

*Конкурентный бенчмаркинг* используется, когда предприятие хочет оценить свою позицию

в своей отрасли. Кроме того, конкурентный бенчмаркинг используется, когда компании необходимо определить целевые показатели эффективности лидерства в отрасли.

*Стратегический бенчмаркинг* используется при определении и анализе производительности мирового класса. Эта форма бенчмаркинга наиболее часто используется, когда компания должна выйти за пределы своей собственной отрасли и на внешний рынок

Таким образом, бенчмаркинг становится искусством обнаружения того, что другие делают лучше нас и изучение, усовершенствование и применение их методов работы. В большинстве крупных иностранных фирм работают специализированные подразделения, занимающиеся бенчмаркингом. Созданы специальные сайты, например, [benchnet.com](http://benchnet.com), [globalbenchmarking.com](http://globalbenchmarking.com). Обычными стали так называемые индустриальные бюро знакомств, где любая компания может найти партнера по обмену новшествами.

Стандартный процесс бенчмаркинга может состоять из ряда этапов: планирование, поиск, наблюдение, анализ, адаптация. В этой связи исследование методологических подходов к эффективной организации бенчмаркинга и создание прикладных разработок, облегчающих его внедрение в деятельность отечественных предприятий, представляется современным и актуальным.

Последние два года бенчмаркинг входит в тройку самых распространенных методов управления бизнесом в крупных международных корпорациях. Причина подобной популярности легко объяснима – бенчмаркинг помогает относительно быстро и с меньшими затратами совершенствовать бизнес-процессы. Внимательно изучая достижения и ошибки других, можно разработать свою собственную модель, которая будет максимально эффективна.

Таким образом, бенчмаркинг – это неотъемлемый элемент управления, дающий возможность непосредственно изучить прогрессивные тенденции разработки стратегий и формирования эффективных бизнес-процессов.

УДК 005.342:005.332.4

## ВЛИЯНИЕ ИННОВАЦИОННОСТИ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Гурина Е.В., Чайка Л.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Существование организаций, занимающихся и производящими схожие или аналогичные объекты, порождает появление такого явления в экономике как конкурентоспособность. В современном мире конкурентоспособность играет одну из решающих ролей в жизни любой организации и обществе, вынуждает организации увеличивать характеристики и качества производимого продукта. Конкурентоспособность предприятия, будучи многогранным понятием, не только включает качественные и ценовые параметры промышленной продукции, но зависит от уровня менеджмента, сложившейся системы управления финансовыми потоками, инвестиционной и инновационной составляющими его деятельности. Кроме того, на конкурентоспособность оказывает влияние конъюнктура, складывающаяся на том или ином рынке, степень конкуренции, испытываемая предприятием со стороны других участников рынка, техническая оснащенность, степень внедрения инноваций, мотивация и квалификация персонала, финансовая устойчивость.

Влияние инноваций на конкурентоспособность предприятий достаточно велико, так как это один из ключевых факторов, определяющих перспективы экономического и социального развития организаций. Инновационная деятельность на организационном уровне приводит к формированию новых технологий управления различных связями.

В результате инновационной деятельности происходит экономия общественного труда, поэтому экономические интересы ее участников сводятся к реализации, распределению и использованию этой экономии. Соотношение издержек и прибыли является определяющим фактором заинтересованности участников в инновациях.

Потребность в экономии издержек в производственной сфере, обуславливает необходимость экономии издержек и в инновационной сфере, так как затраты в последней являются одним из элементов экономии в производстве.

Внедрение инноваций – это непрерывные усилия организации по освоению открытия, цепь

улучшений, приобретающих значение только в ходе экстенсивного процесса дополнительного конструирования, модификации и множества мелких улучшений, которые доводят его до рынка. Все это объединяется термином «опытно-конструкторские работы» в общем контексте научных исследований и опытно-конструкторских работ (НИОКР).

Экономическая целесообразность использования инноваций для предприятий зависит от возможности обеспечения с их помощью экономии производственных затрат и качество продукции, а в конечном итоге способствовать интенсификации экономического роста за счет качественных факторов. Кроме того, выживаемость организаций в странах в большей мере зависит не от их способности изготовить тот или иной продукт, а от готовности и скорости обнаружения новых общественных потребностей и предлагать обществу собственные продукты (товары и услуги), способствующих их удовлетворению. Производитель и в этом случае может получить высокую прибыль. Локальный эффект инновации образуется на уровне реализации обособленного экономического интереса хозяйствующего субъекта. Однако в конечном счете инновации приводят к эффективной реализации общественных потребностей, следствием чего является повышение продуктивности всей национальной экономики в целом.

На заинтересованность субъектов в приобретении новшества оказывает влияние состояние рыночной и инновационной инфраструктуры, возможности выхода на мировой рынок, институтов венчурного финансирования,

Соответственно, в современных условиях функционирования экономики присутствует зависимость между инновационной деятельности предприятий и их конкурентоспособностью. Следствием того, что деятельность организаций все более приобретает международный характер, внедрение инноваций становится одним из основных факторов конкурентоспособности международных компаний.

## ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИКИ

Абдыев А.Д., Гундина М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Между операторами преобразования поверхности (сжатия – растяжения, вращения) и действием их на функцию, определяемой на этой поверхности существует тесная связь.

При исследовании данных в географии возникла потребность в представлении выбранных данных на сфере. Дьютон Р. предложил использовать геодезическую сферическую конструкцию для моделирования рельефа поверхности планет [1].

Триангуляция поверхности – это разбиение поверхности на треугольники, вообще говоря, криволинейные. Триангуляция сферы позволяет разбить сферу на более простые составные части, исследовать каждую из которых проще, чем поверхность в целом [2, 3].

Одним из важнейших примеров использования данной конструкции в компьютерной графике является представление функции, определенной по множеству направлений. Такой функцией является двунаправленная функция отражения и распределения. Функция  $f_r(\vec{w}_i, \vec{x}, \vec{w}_0)$  описывает соотношение в точке  $\vec{x}$  на поверхности между входящим излучением направления  $\vec{w}_i$  и выходящим излучением направления  $\vec{w}_0$ . Ее можно описать, используя сферические гармоники, как естественное расширение базисных функций Фурье, представленных на сфере [4, 5].

Рассмотрим пример, связывающий сжатие поверхности с сжатием функции, определенной на поверхности. Заметим то, что существует тесная связь между представлением поверхности и представлением функции, определяемой на этой поверхности. Это утверждение понадобится в дальнейшем, когда от исследования самой поверхности будем переходить к исследованию функции, определенной на этой поверхности.

Заметим, что разбиение сферы может быть выполнено различными способами. Одним из способов состоит в симметричном разбиении сферы на области одинаковой формы и равной площади.

Сжатие поверхности тесно связано с сжатием функции на этой поверхности. Рассмотрим случай единичной сферы.

Пусть функция задана следующим образом:

$$f(s) = f(\theta, \varphi) = \cos^2 \theta, \quad s \in S^2. \quad (1)$$

Построим график этой функции (рисунок 1) и соответствующую ей поверхность на сфере, высотой которой является значение функции  $f$  (рисунок 2).

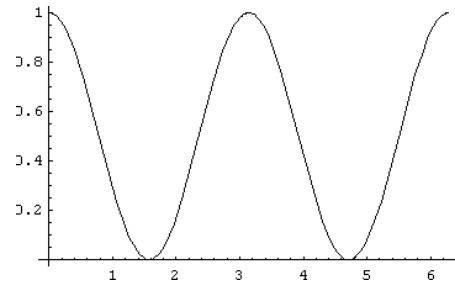


Рисунок 1 – График функции

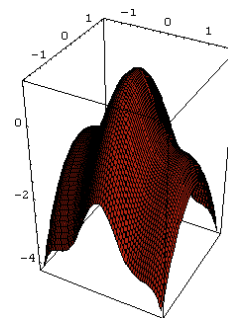


Рисунок 2 – Построенная поверхность

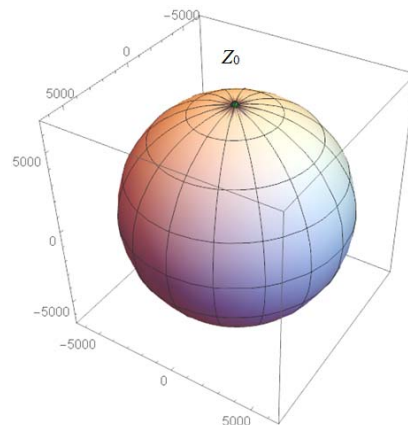


Рисунок 3 – Точка  $Z_0$  на сфере

Следовательно, алгоритм сжатия поверхности может быть применен для сжатия графика функции, определяемой на поверхности.

Теперь пусть  $\lambda$  – долгота,  $\varphi$  – это широта в геоцентрической системе координат. Известно, что широтой называется угол между радиус-вектором и плоскостью экватора. Долгота есть угол между плоскостью, проходящей через заданную точку и осью вращения и плоскостью меридиана, принятого в качестве нулевого. Связь между сферической системой и глобальной декартовой системой определяется по следующим формулам:

$$x = R \cos \varphi \cos \lambda, \quad (2)$$

$$y = R \cos \varphi \sin \lambda, \quad (3)$$

$$z = R \sin \varphi, \quad (4)$$

где радиус  $R = 6371$  км. Рассмотрим сферу заданного радиуса  $R$  (рисунок 3).

Найдем канонические уравнения прямой, проходящей через точки  $Z_0(0, 0, R)$ ,  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  (рисунок 4).

$$\frac{x-0}{x_0} = \frac{y-0}{y_0} = \frac{z-R}{z_0-R}. \quad (5)$$

Рассмотрим плоскость, заданную уравнением:

$$z = -2R. \quad (6)$$

Уравнение указанной прямой запишем в виде параметрических уравнений:

$$x = x_0 t, \quad (7)$$

$$y = y_0 t, \quad (8)$$

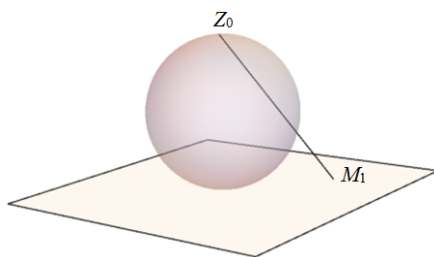


Рисунок 4 – Взаимное расположение точек  $Z_0, M_1$

$$z = R + (z_0 - R)t, \quad (9)$$

Подставим эту систему уравнений в уравнение плоскости:

$$R + (z_0 - R)t_0 = -2R. \quad (10)$$

Тогда решим уравнение относительно неизвестного параметра  $t_0$ :

$$t_0 = -\frac{3R}{(z_0 - R)}. \quad (11)$$

При  $t = t_0$  происходит пересечение прямой и плоскости. Найденное значение  $t_0$  подставляем в параметрические уравнения прямой, тогда получаем координаты точки пересечения  $M_1$ :

$$M_1 = \left( -\frac{3R}{(z_0 - R)} x_0, -\frac{3R}{(z_0 - R)} y_0, -2R \right). \quad (12)$$

Четвертой координатой точки  $M_0$  может рассматриваться значение уровня некоторой величины различной природы (уровень радиоизлучения, интенсивность яркости пикселя, высота над уровнем моря и т. д.).

Если четвертая координата  $h$  точки  $M_0$  есть абсолютное значение уровня радиоизлучения, то этой координате можно поставить в соответствие длину перпендикуляра, который проецируется в точку  $M_1$ .

Тогда на плоскость  $z = -2R$  опускаем перпендикуляр длиной  $h$ . При непрерывном отображении сферы на плоскость получим поверхность уровня радиоизлучения.

Поскольку стереографическая проекция обладает обратным оператором, возможно установление биекции между данной сферой и плоскостью.

### Литература

1. Goliias, N.A. Delaunay triangulation and 3D adaptive mesh generation / N.A. Goias, R.W. Dutton // Stanford: Center for Integrated Systems, 1999. – V. 25. – no. 3–4. – P. 331–341.
2. Keil, J.M. Classes of graphs which approximate the complete Euclidean graph / J.M. Keil, C.A. Gutwin // Discrete and Computational Geometry, 1992. – no. 7. – P. 13–28.
3. Guibas, L.S. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of Voronoi / L.S. Guibas, J. Stolfi // ACM Transactions on Graphics, 1985. – no. 4. P. 74–123.
4. McEwen, J.D. A directional continuous wavelet transform on sphere / J.D. McEwen, M.P. Hobson, D.J. Mortlock, A.N. Lasenby // IEEE Trans. Sig. Proc. – 2006.
5. Wiaux, Y. Correspondence principle between spherical and Euclidean wavelets / Y. Wiaux, L. Jacques, P. Vanderghenst // Astrophys. J, 2005. – V. 632. – no. 1. – P. 15–28.

УДК 330.332

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАЛОГОВОГО КОНТРОЛЯ

Козленкова О.В., Юденко Н.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

На сегодняшний день ни одно государство мира не может обойтись без налогов. Налоги являются тем универсальным механизмом, с помощью которого государство влияет на экономическую активность в стране, создает инвестиционный климат, формирует бюджет, определяет свои расходы и доходы и другое.

В настоящее время бесперебойное финансирование предусмотренных бюджетами мероприятий требует систематического пополнения финансо-

вых ресурсов на республиканском и местном уровнях. Это достигается в основном за счет уплаты юридическими и физическими лицами налогов и других обязательных платежей. В соответствии с действующим налоговым законодательством и другими нормативными актами плательщики обязаны уплачивать указанные платежи в установленных размерах и в определенные сроки.

Налоговый контроль призван обеспечить полное и своевременное поступление платежей

в бюджет и во внебюджетные фонды, а также соблюдение субъектами предпринимательской деятельности действующего законодательства о налогах и сборах. Поскольку налоговым контролем охвачены все организации, независимо от форм собственности, и физические лица, данные, полученные в результате контроля, позволяют судить с эффективности налогообложения, выявлять его «слабые» места разрабатывать меры по совершенствованию налоговой системы.

На практике организации и физические лица допускают несвоевременную уплату налогов и других обязательных платежей в связи с рядом объективных и субъективных причин. Сегодня перед налоговыми органами встает серьезная проблема – контроль за правильностью, своевременностью и полнотой взимания налогов и его совершенствование.

Создание прочной финансовой основы существования государства и общества в целом, успешное осуществление реформ в сфере налогообложения, своевременное и полное формирования бюджетов всех уровней невозможны без создания системы эффективного налогового контроля, призванного обеспечить финансовые интересы государства при одновременном соблюдении прав организаций и физических лиц. Поэтому вопросы, связанные с изучением организации налогового контроля в нашей республике и за рубежом, анализом эффективности работы контролирующих налоговых органов, а также определением путей совершенствования налогового контроля являются весьма актуальными и вызывают обоснованный интерес.

Налогам отводится важное место среди экономических рычагов, при помощи которых госу-

дарство воздействует на рыночную экономику. С помощью налогов определяются взаимоотношения предпринимателей, предприятий всех форм собственности с государственными и местными бюджетами, а также с вышестоящими организациями. При помощи налогов регулируется внешнеэкономическая деятельность, включая привлечение иностранных инвестиций, формируется хозрасчетный доход и прибыль предприятия. Налоговая система любого государства должна отвечать определенным принципам, как классическим (общенациональным), так и внутринациональным. Соблюдение этих принципов может свидетельствовать о грамотном построении системы налогов и сборов страны.

В современных условиях создание прочной финансовой основы функционирования государства и общества в целом, успешное осуществление реформ в сфере налогообложения, проводимых в настоящее время, своевременное и полное формирование бюджетов всех уровней невозможно без создания системы эффективного налогового контроля, призванного обеспечить финансовые интересы государства при одновременном соблюдении прав организаций и физических лиц.

Решение проблем налогового контроля является сверх актуальным, что обусловлено необходимостью системного и всестороннего анализа научных, практических и нормативно-правовых материалов в области механизма формирования налоговой политики государства. Решение данных проблем так же важно для определения основных направлений его совершенствования, с целью установления оптимального режима налогообложения.

УДК 535.317

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНАНСОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Серченя Т.И., Юхневич О.А.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Финансы – это специфическая форма производственных отношений, связанных с формированием, распределением и использованием централизованных и децентрализованных фондов денежных средств, идущих на цели расширенного воспроизводства и удовлетворение потребностей организации (предприятия). Финансы как часть производственных, денежных отношений имеют объективный характер и выступают как экономическая категория. Особенность финансов, как экономической категории заключается в том, что они всегда имеют денежную форму выражения [1].

Финансовая деятельность организации (предприятия) – это система форм и методов, используемых для финансового обеспечения функцио-

нирования организаций (предприятий) и достижения ими поставленных целей, т. е. это практическая финансовая работа, направленная на всестороннее управление денежными потоками внутри организации (предприятия).

Финансовую деятельность организации (предприятия) направлена на решение следующих основных задач:[1]

- финансовое обеспечение текущей производственной деятельности;
- поиск резервов увеличения доходов, прибыли, повышения рентабельности и платежеспособности;
- выполнение финансовых обязательств перед субъектами хозяйствования, бюджетом, банками;

– мобилизацию финансовых ресурсов в объеме, необходимом для финансирования производственного и социального развития, увеличения собственного капитала;

– контроль за эффективным, целевым распределением и использованием финансовых ресурсов.

Финансовая деятельность организации (предприятия) включает:

– создание уставного капитала организации (предприятия);

– задействование объединенных финансовых средств в различных сферах деятельности организации;

– деятельность по распределению и перераспределению средств от основной деятельности для покрытия текущих нужд производства;

– финансовые отчисления в бюджет;

– начисление выплат собственникам организации;

– деятельность по созданию резервных финансовых ресурсов организации;

– создание финансовых ресурсов для выплат работникам, а также для обеспечения их социальной защиты;

– управление дополнительными финансовыми ресурсами, полученными в качестве прибыли от деятельности организации;

– управление внутренней динамикой финансовых средств организации в случае возникновения такой необходимости (например, объединение в ассоциацию, группы, концерны и т. д.).

Финансовая устойчивость – внутренняя сторона финансового состояния организации (предприятия), оцениваемая с точки зрения долгосрочной перспективы, прямо зависящая от структуры источников формирования активов. Финансовая устойчивость организации (предприятия) характеризует стабильность (нестабильность) ее деятельности и отражает сбалансированность товарных и денежных потоков, доходов и расходов, средств и источников их формирования. Оценивается системой коэффициентов, исчисляемых в процессе анализа финансового состояния организации (предприятия).

Для обеспечения финансовой устойчивости предприятие должно обладать гибкой структурой капитала, уметь организовать его движение таким образом, чтобы обеспечить постоянное превышение доходов над расходами с целью сохранения платежеспособности и создания условий для самовоспроизводства.

Устойчивое финансовое положение в свою очередь оказывает положительное влияние на выполнение производственных планов и обеспечение нужд производства необходимыми ресурсами. Поэтому финансовая деятельность как составная часть хозяйственной деятельности должна быть направлена на обеспечение планомерного поступления и расходования денежных ресурсов, выполнение расчетной дисциплины,

достижение рациональных пропорций собственного и заемного капитала и наиболее эффективное его использование.

Пути повышения эффективности деятельности предприятия – это совокупность конкретных мер и мероприятий для роста факторов, которые влияют на показатели эффективности. Основными направлениями в повышении уровня эффективности деятельности предприятия является:

– снижение трудоемкости и повышение производительности труда;

– снижение материалоемкости производства и рациональное использование ресурсов с учетом их ограниченности;

– снижение фондоемкости продукции и увеличение инвестиционной деятельности предприятия.

Важным аспектом в повышении эффективности деятельности предприятия является режим экономии, но при этом нужно понимать что экономия в потреблении сырья и материалов, топлива, энергии не должна сказаться на качестве выпускаемой продукции.

Для того, чтобы качество улучшалось в режиме экономии, необходимо ввести в эксплуатацию более новое, современное и экономичное оборудование, которое позволит снизить трудоемкость и поднять производительность труда, улучшить или изменить технологию производства, которая снизит материалоемкость производства и позволит использовать ресурсы рационально, на сколько это возможно, усовершенствовать методику контроля за качеством продукции и свести количества брака к минимуму.

Повышение квалификации работников – это еще один немаловажный фактор в достижении повышения эффективности предприятия. Это нужно для того, чтобы работники были взаимозаменяемы, чтобы повысить производительность труда.

Так же для улучшения финансовых и экономических показателей, которые влияют на эффективность деятельности предприятия в целом, нужно правильно выстроить взаимоотношения с потребителем, для этого необходимо объяснить покупателю, чем координально отличается ваш товар, и какую выгоду получит потребитель, если купит ваш товар.

И последнее, это модернизация стиля управления и новый подход в принятии управленческих решений, исходя из направления в котором происходит улучшения для достижения максимально эффективного результата.

Таким образом, финансовое состояние организации (предприятия) экономическая категория, характеризующая состояние капитала организации (предприятия), обеспеченность финансовыми ресурсами, платежеспособность, ликвидность и другие важные показатели деятельности субъекта хозяйствования.

Ключевая цель оценки финансового состояния организации (предприятия) – получение

определенного числа основных (наиболее представительных) параметров, дающих объективную и обоснованную характеристику финансового состояния. Это относится, прежде всего, к изменениям в структуре активов и пассивов, в расчетах с дебиторами и кредиторами, в составе прибыли и убытков.

Для придания комплексного системного характера существующей оценке финансового состояния предприятия необходимо учитывать все аспекты финансово-хозяйственной деятельности предприятия, используя при этом в полной мере всю имеющуюся информационную базу анализа. Это позволит более точно и достоверно отражать

финансовое состояние организаций (предприятий), выявлять угрозу их банкротства на более ранней стадии, а также снижать финансовые риски при проведении различных финансово-кредитных операций.

#### Литература

1. Базылев, Н.И. Экономическая теория : учебное пособие / Н.И. Базылев Москва : ИНФРА-М, 2014.
2. Войтоловский, Н.В. Комплексный экономический анализ предприятия / Н.В. Войтоловский, А. П. Калинина. – Санкт-Петербург : Питер, 2014.

УДК 331.5:005.95

### ПЕРСОНАЛ: ПРЕОДОЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМ

Мещерякова Е.В.<sup>1</sup>, Тулекбаева А.К.<sup>2</sup>, Кузьмич Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

В современных условиях компетентность руководителя в области проведения изменений считается базовой наряду с умением осуществлять руководство в условиях неопределенности. Менеджер – должен быть способен осознать, когда изменения желательны, а когда неизбежны. При этом необходимо учитывать, любое изменение встречает сопротивление, которое иногда может быть столь сильным, что внедрение инноваций становится невозможным. Как же проводить изменения и добиться поставленной цели в развитии бизнес-процессов? Проблемы, которые могут возникнуть при ошибках в работе с персоналом в процессе проведения изменений, порождающих мощное сопротивление, сводящее к нулю все усилия руководства, обобщены и рассмотрены ниже. [1, 2, 3].

1. Нет ясности в формулировании целей, которые должны быть достигнуты. Не зная конечной цели, люди могут не видеть потребности в изменениях и считать ошибкой их проведение.

2. Разработанный план изменений в технических, производственных и организационных областях, не затрагивает работу с персоналом, являющимся носителем процесса. Каждый работник должен знать – что происходит и что его ожидает, когда результат будет достигнут.

3. Люди меняются медленнее, чем техника и технологии. Поэтому подготовку к проведению изменений надо начинать заранее, втягивая персонал в процесс по мере его усиления.

4. Персонал организации должен не только проводить изменения, но и участвовать в подготовке и проведении этого процесса, люди хотят чувствовать себя не объектом, а субъектом. Лучшее всего, если сотрудники будут говорить о

предстоящих изменениях в терминах «наш проект», а не «руководство решило».

5. Отсутствие постоянной поддержки и активного участия в процессе трансформации руководства, что не позволяет работать системно и вовлечь в процесс перемен всех сотрудников (в той или иной форме).

6. Отсутствие независимого консультанта, который дает методическое обеспечение, участвует в разрешении конфликтов и вносит предложения, но не участвует в принятии решений. Принимая во внимание необходимость решения обозначенных проблем, рассмотрим пошагово алгоритм работы с людьми в процессе инноваций [5].

1. **Постановка проблемы, формулирование цели перемен.** Исходным моментом для изменений является неудовлетворенность текущим состоянием дел. Важно, чтобы это осознание проблемы, которое появилось у руководителей, получило дальнейшее развитие и возникло коллективное восприятие неудовлетворительного состояния [4].

В первую очередь необходимо определить повод для изменений и сформировать осознание, что проведение перемен неизбежно. Не анализ и поиск виноватых, а решение проблемы, что и преобразуется в цель, которую формулирует руководство организации.

2. **Сбор данных по проблеме. Формирование направлений действий.** Осознание неизбежности перемен должно присутствовать на протяжении всего времени проведения изменений в жизнь, иначе есть опасность, что проект будет не доведен до конца. Необходимость изменений приводит к поиску возможностей. Это называется, по определению К. Левина, «размо-



раживание», т. е. освобождение от старых стереотипов деятельности и отношений [5].

Для детальной проработки проекта будущей организации формируется группа в составе 20–40 человек, которая разбивается на несколько рабочих команд по 5–6 человек для участия в разработке проекта будущего. Подключение сотрудников организации позволяет им участвовать в процессе и понимать его, снимая в дальнейшем сопротивление переменам, и в тоже время этот процесс помогает учиться новому и развиваться. Для оценки возможности достижения целей при проведении изменений можно использовать анализ поля сил (понятие ввел Курт Левин) [5]. Для более точного изучения процесса изменений можно использовать ромб Левитта, выделив основные сегменты, подвергаемые воздействию (задачи – люди – структуры – системы). Изменения в одном сегменте приводят к изменениям во всех других [6]. После произведенного анализа каждого сегмента выбираются факторы влияния на бизнес будущего [1]: *сильного стратегического влияния, умеренного стратегического влияния, незначительного стратегического влияния*. Каждая команда выделяет 10 стратегических факторов, требуемых организации для реализации цели будущего.

**3. Образование команды, проводящей внедрение инноваций.** После того, как разработан проект будущего организации, определены сдерживающие и движущие силы проведения изменений, а также факторы, от которых будет зависеть бизнес будущего, формируется команда, которая и будет проводить работу по трансформации. Ядро этой команды должна составлять группа, работавшая над проектом, но в неё могут быть включены и новые сотрудники. Во главе изменений должен стоять лидер, а в руководящей команде должны быть представлены все уровни организации. Целесообразно присутствие следующих пяти категорий: *представители высшего руководства; менеджеры проектных команд, или линейные менеджеры; молодые сотрудники*, которые вносят новые идеи и представляют собой основной источник энергии и энтузиазма; *специалисты службы управления персоналом* для разработки методики исследований и отчетов, участвуют в моделировании движущих сил; *ключевые сотрудники организации*, которые учатся новому и делятся с остальными своими идеями и нацеленностью на действия. Команда, проводящая изменения, осуществляет диагностику по выбранным факторам влияния [1]. По каждому из факторов определяются степень риска и зоны уязвимости.

**4. Разработка программы действий.** Анализ риска позволяет выделить приоритеты, определить задачи и наметить действия. Исходя из целей составляются мероприятия по их реализации. Процесс разработки программы действий включает моделирование рычагов воздействия по глав-

ным направлениям (4–5); прогнозирование итоговых результатов и динамики развития; выявление первостепенных и вспомогательных связей

**5. Коммуникация с персоналом.** Обуславливает ясность и чёткость направлений действий что определяет мотивацию сотрудников.

Готовятся письменные документы о целях и стратегии перемен, которые доводятся до всех, в первую очередь до тех, кого они будут касаться. Проводится общее собрание, на котором должны быть все руководители и команда по внедрению инноваций («глаза в глаза»). В конечном итоге необходимо добиться того, чтобы на сторону изменений безоговорочно встали 7–10% сотрудников (положительно настроенные люди, с мнением которых считаются).

Если изменения значительные, то особенно важно сдерживать начальные чувства и реакции персонала на предстоящие перемены (любые сильные эмоции). Реальная ситуация может быть воспринята должным образом после того, как реакции персонала выражены и признаны как имеющие право на существование.

**6. Управление направлениями изменений.** Обычно 25% сотрудников поддерживают после предыдущего этапа изменения, 25% – сопротивляются по тем или иным причинам, 50% – равнодушных (тех, кто безразличен). Для усиления процесса нужны хотя бы маленькие победы, сдвигающие систему с места, поэтому начинать целесообразно с рычагов влияния краткосрочного плана. Чем чаще приходит ощущение успеха, тем более стойко вытекающее из него поведение. Сотрудники должны получить отчетливые доказательства важности и возможности нововведений.

**7. Закрепление в организационной культуре** [4]. Организационная культура сопротивляется изменениям. В целом степень сопротивления изменениям в культуре организации пропорциональна величине изменений по содержанию. Эту задачу можно решить: через изменение объектов внимания со стороны менеджеров; изменение стиля управления; перепроектирование ролей и изменение фокуса в программах обучения; изменение критериев стимулирования; смену акцентов в кадровой политике; смену организационной символики и обрядности.; усиление мотивации сотрудников (нематериальные формы) и командной (совместной) работы и т.д.

**8. Мониторинг процесса.** Петли обратной связи должны быть на каждом шаге изменений. С помощью анкет и сравнимых аналитических показателей проводится мониторинг изменений и определяется положение дел по проекту. Для этого необходима система оценки эффективности действий, которая содержала бы следующие критерии *опережающие* (призванные оценить, соответствует ли требованиям будущего поведение сотрудников), *текущие* (оценивающие возможности выхода на новые уровни) и *запаздывающие*

(показывающие влияние поведения сотрудников на показатели деятельности компании).

#### Литература

1. Грэттон Л. Живая стратегия: Как поместить людей в центр решения корпоративных задач. Днепропетровск: Баланс-Клуб, 2003. 288 с.
2. Армстронг М. Стратегическое управление человеческими ресурсами / пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 2002. 328 с.
3. Ульрих Д. Эффективное управление персоналом: новая роль HR-менеджера в организации.- М.: Вильямс, 2007. 304 с.
4. Фрайлингер .К., Фишер И. Управление изменениями в организации / пер с нем.М.: Книгописная палата, 2002. 264 с.
5. Мещерякова Е. В, Тулекбаева А.К. Изменения в организации: персонал и процессы. // Труды БГТУ. – 2017. – № 2 (202); Серия 5. Экономика и управление. – С.51-57.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Шуляковский Р.Г., Асадчая М.В.</i> <b>НОВЕЙШИЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ В КАНУН 55-ЛЕТИЯ СО ДНЯ ОБРАЗОВАНИЯ</b>                                 | 5  |
| <i>Кисель В.Э., Руденков А.С., Кулешов Н.В.</i> <b>ИТТЕРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЯ</b>                                                         | 7  |
| <i>Сикорский Д.А., Котов М.Н., Подскребкин И.В.</i> <b>ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ОАО «ПЕЛЕНГ»</b>                                                              | 9  |
| <b>Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ</b>                                                                                                                |    |
| <i>Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Кмита К.Ю.</i> <b>ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МЕАНДРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ</b>                                                                          | 10 |
| <i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А.</i> <b>МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ</b>        | 12 |
| <i>Бусько В.Н., Рубникович С.П., Прялкин С.В.</i> <b>УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ВИНТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ДЕНТАЛЬНЫЙ ИМПЛАНТАТ-АБАТМЕНТ» ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ</b>            | 13 |
| <i>Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н.</i> <b>ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЗЫ КУМАХОВА</b>                                                               | 15 |
| <i>Здоровцев С.В., Кушиеров Д.П., Сушко В.А.</i> <b>ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ</b>                                                    | 17 |
| <i>Рудницкий В.А., Зинькевич Н.В., Кутепов А.Ю., Гнутенко Е.В., Ланцман Г.А.</i> <b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПОДАТЛИВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ ТВЕРДОМЕРОВ</b> | 19 |
| <i>Kozlovskiy A.G., Bezuglyi M.A.</i> <b>METHOD OF CONTROL OF A SHAPE OF ELIPSOIDAL REFLECTORS ACCORDING TO DEVELOPED STAND</b>                                                                    | 21 |
| <i>Костенко Е.Р.</i> <b>РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОРОСИТЕЛЯМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДАЧИ ОГНЕТУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА</b>                                                | 22 |
| <i>Крень А.П.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВАНИИ ЗАКОНА МЕЙЕРА</b>                                                                                     | 24 |
| <i>Кулагин В.Н., Линевиц С.Я., Бусько В.Н.</i> <b>РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ, МОЩНОСТИ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ</b>                                                                | 26 |
| <i>Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.</i> <b>ОЦЕНКА РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ</b>                                                      | 28 |
| <i>Крень А.П., Ланцман Г.А., Рудницкий В.А.</i> <b>ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ</b>                                                                                | 30 |
| <i>Левко И.А.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА В ПРИСУТСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ</b>                                                                                         | 32 |
| <i>Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.</i> <b>ВЛИЯНИЕ КОММУТАТОРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ТЕСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ</b>                                                                                  | 34 |
| <i>Малютин Д.М.</i> <b>ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ГРАВИМЕТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И САМОНАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ</b>                                                                                   | 35 |
| <i>Медведев Н.В.</i> <b>АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОРТОВЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА</b>                                                             | 38 |
| <i>Микитевич В.А., Свистун А.И., Жарин А.Л.</i> <b>УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ</b>                                                            | 40 |
| <i>Лобко А.С., Мисевич О.В., Федоров А.А., Кучинский Н.А.</i> <b>ФОСВИЧ-ДЕТЕКТОР ЛЕГКИХ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ</b>                                                                                     | 41 |
| <i>Мисюкевич Н.С.</i> <b>РАСЧЕТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАДЕРЖЕК ОПОВЕЩЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ</b>                                                                                            | 43 |
| <i>Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.</i> <b>МЕТОД СИНТЕЗА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В РЛС С ЛИНЕЙНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ</b>                                                                   | 45 |
| <i>Невдах В.В., Антошин А.А.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗВИТИИ ПОЖАРА В ОГРАЖДЕНИЯХ</b>                                                                               | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Кухарев И.А., Невдах В.В.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА В СМЕЖНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ</b>                                                                                                                   | 48 |
| <i>Распопов В.Я.</i> <b>ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА (ВТГ) С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ</b>                                                                                                                     | 50 |
| <i>Киселёв М.Г., Монич С.Г., Семенович В.П.</i> <b>УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБНЫХ БОРОВ</b>                                                                                                                               | 52 |
| <i>Шарандо В.И., Кременькова Н.В., Чернышев А.В., Булатов О.В., Калошин В.А., Кинжагулов И.Ю.</i> <b>КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ НАМАГНИЧЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДОРАБОТАННЫМИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ МТНП-1</b>                                 | 54 |
| <i>Шарандо В.И., Кременькова Н.В., Лукьянов А.Л., Чернышев А.В., Булатов О.В., Калошин В.А., Кинжагулов И.Ю.</i> <b>КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ НАМАГНИЧЕННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДОРАБОТАННЫМИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ МТДП-1</b> | 55 |
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Яхимович П.Г.</i> <b>УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ОСТРОТЫ РЕЖУЩИХ КРОМОК МЕДИЦИНСКИХ СКАЛЬПЕЛЕЙ</b>                                                                                                                        | 57 |
| <i>Воробей Р.И., Тявловский К.Л., Мартинкевич А.В., Стефурак С.А., Кошель Е.В.</i> <b>ТИПОВЫЕ ОШИБКИ ВЫПОЛНЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОХРАННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ</b>                                                                             | 59 |
| <i>Антошин А.А., Олефир Г.И., Безлюдов А.А.</i> <b>ЛИНЕАЛИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРЫ ЗАДЫМЛЕННОЙ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ</b>                                                                            | 61 |
| <i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.</i> <b>ОБ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ</b>                                                                                 | 63 |
| <i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> <b>ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА БАЗЕ СТРУКТУР С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ</b>                                                                           | 65 |
| <i>Баев А.Р., Митьковец А.И., Коновалов Г.Е., Парадинец В.В.</i> <b>О ВОЗБУЖДЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ</b>                                                                                          | 67 |
| <i>Реутская О.Г., Плескачевский Ю.М., Таратын И.А.</i> <b>ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ</b>                                                                                                                   | 69 |
| <i>Деленковский Н.В., Гнусин А.Б.</i> <b>УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ ЗОНЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИ</b>                                                                                                     | 71 |
| <i>Бондарев В.В.</i> <b>ОЦЕНКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ</b>                                                                                                                                                                                   | 72 |
| <i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> <b>ОДНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ</b>                                                 | 74 |
| <i>Мисюкевич Н.С.</i> <b>К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ И ЦЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ И ОХРАНЫ ОБЪЕКТОВ</b>                                                                                                                        | 76 |
| <i>Бобрикович А.А., Гусев О.К., Воробей Р.И.</i> <b>ПРОВЕДЕНИЕ СУБЪЕКТИВНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ КАЧЕСТВА ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ</b>                                                                                               | 78 |
| <i>Ахремчук Д.А., Зданович С.В., Жуковский П.В., Пантелеев К.В., Кравцевич А.В.</i> <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ</b>           | 80 |
| <i>Гладкий А.В.</i> <b>КОНЦЕПЦИЯ ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПЛАТФОРМ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ</b>                                                                                                                                                  | 82 |
| <i>Джилавдари И.З., Мекид С.Н., Ризноокая Н.Н., Касьмин В.Ю.</i> <b>ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ</b>                                                                                      | 84 |
| <i>Тявловский А.К., Жарин А.Л., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Мухуров Н.И., Опеляк М.</i> <b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b>                              | 86 |
| <i>Сопряков В.И., Шлеведа Ю.В.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДИОДОВ</b>                                                                                                                   | 88 |
| <i>Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П., Юран С.И.</i> <b>УСТРОЙСТВО ЭКСИМЕР-ЛАЗЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ЗРЕНИЯ</b>                                                                                                                             | 89 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> <b>МЕТОД ОПТИКОВОЛОКОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА РЕСПИРАБЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ АТМОСФЕРЫ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</b> .....                                                                                                                                       | 91  |
| <i>Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Филипенко В.А., Солодуха В.А.</i> <b>КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА КРЕМНИЙ-ДВУОКСИД КРЕМНИЯ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ</b> ..... | 93  |
| <i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> <b>МЕТОД СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА</b> .....                                                                                                                                                              | 95  |
| <i>Тявловский А.К., Гусев О.К., Жарин А.Л., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Воробей Р.И., Колтунович Т.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ</b> .....                                                                                                              | 97  |
| <i>Кривицкий П.Г., Исаев А.В., Матюшевский В.М., Оксенчук И.Д., Кузьмицкая С.М.</i> <b>РЕГУЛИРОВКА ПЕРИМЕТРА РЕЗОНАТОРА КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА ЦИФРОВОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА</b> .....                                                                                                              | 99  |
| <i>Кицак А.И., Есипович Д.Л., Челедюк Е.С.</i> <b>ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ МОДУЛЕМ ПОРОШКОВОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ</b> .....                                                                                                                                         | 101 |
| <i>Костина Г.А., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Самарина А.В., Кондратьева Н.К.</i> <b>АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРОВАНИЕМ В СИСТЕМАХ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ</b> .....                                                                                                                           | 103 |
| <i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Бабук Е.П., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СТРУКТУРОСКОПИИ ЧУГУНОВ</b> .....                                                                                                                       | 105 |

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ананьин В.Н., Мирончик А.М., Мохнач М.В.</i> <b>ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ СОСТАВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ВЫПУСКАЕМЫЕ БЕЛОРУССКИМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ИНСТИТУТОМ МЕТРОЛОГИИ</b> .....   | 107 |
| <i>Баенская Е.А., Силич В.В., Ярмолович М.А.</i> <b>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ</b> .....                                                | 108 |
| <i>Батурин А.П., Терещенко Н.Ф.</i> <b>ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА РЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУРАХ</b> .....                               | 111 |
| <i>Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Бручковская С.И., Беляев Ю.В.</i> <b>МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АЛЬБЕДО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПРОФИЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ</b> .....                      | 113 |
| <i>Волков А.Н., Крешинёв М.М., Киселёв М.Г.</i> <b>ИЗМЕРЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ОЖИДАНИЯ</b> .....                                                       | 115 |
| <i>Волчэк С.А., Завацкий С.А., Петрович В.А., Серенков В.Ю., Петлицкий А.Н.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИММИТАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ</b> .....                                   | 117 |
| <i>Волынец О.А., Волынец А.С.</i> <b>НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ</b> .....                                                                             | 119 |
| <i>Будай А.Г., Гринчук А.П., Громько А.В.</i> <b>К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ</b> .....                       | 121 |
| <i>Будай А.Г., Гринчук А.П., Громько А.В.</i> <b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАДИОГЕОГРАФИЧЕСКОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СО СФЕРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ</b> .....     | 123 |
| <i>Гуревич В.Л., Разумный А.И.</i> <b>ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ В РАМКАХ СМК</b> .....                                                             | 124 |
| <i>Есьман Г.А., Шевель К.П.</i> <b>УСТАНОВКА ПОВЕРКИ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ</b> .....                                                                                                        | 126 |
| <i>Петрович В.А., Завацкий С.А., Волчэк С.А., Серенков В.Ю., Петлицкий А.Н.</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕМАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ</b> .....                             | 128 |
| <i>Купреева Л.В., Солодуха Ю.А.</i> <b>О НОРМАТИВНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ К ПРОЦЕДУРЕ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b> ..... | 130 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ленкевич О.А., Михейчик А.В.</i> ГИБКАЯ МЕТОДОЛОГИЯ «SCRUM». ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ.....                                                                                                     | 132 |
| <i>Ленкевич О.А., Чурак Н.В.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТИ И ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА.....                                                                                        | 133 |
| <i>V. Lysenko, K. Zimmermann</i> METHODS FOR DESIGNING BIOLOGICALLY INSPIRED ROBOTS.....                                                                                                                         | 135 |
| <i>Жагора Н.А., Макаревич В.Б., Горошкова А.Н., Алятина Н.Н., Таланова Т.И., Дорогонько А.Г.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОСКОГО УГЛАГРАДУСА.....                                            | 137 |
| <i>Галаган Р.М., Момот А.С.</i> СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ИНФОРМАТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....                                                            | 139 |
| <i>Найдёнова В.И., Василевич О.В.</i> РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ В БЕЛАРУСИ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....                                                                                  | 141 |
| <i>Омелян А.В., Петренко С.Ф., Новаковський О.Г., Антонюк В.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЦИЛЛЯТОРА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....                                                         | 145 |
| <i>Паньков С.Б., Терещенко Н.Ф.</i> ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ТРАНСКУТАННОМ МЕТОДЕ ВВЕДЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ.....                                                                                                     | 147 |
| <i>Рубаник В.В., Рубаник В.В.мл., Петрова-Буркина О.А.</i> СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ УЧАСТКОВ ПРОТЯЖЕННОГО ИЗДЕЛИЯ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.....                                                          | 149 |
| <i>Петрусенко П.А., Гребень О.Н.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ, РЕГУЛИРУЮЩИХ ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАМКАХ ТРЕБОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЕВРО-5 И ЕВРО-6.....                                         | 150 |
| <i>Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РЕГУЛИРОВКИ СРЕДСТВ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ПОДГОТОВКЕ К ПОВЕРКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ.....                        | 152 |
| <i>Плакса Д.В., Терещенко Н.Ф.</i> МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МАКСИМИЗАЦИИ ЛЕЧЕБНОГО ЭФФЕКТА МИКРОВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ТЕРАПИИ.....                                                                                       | 154 |
| <i>Почужевский О.Д., Почужевская Ю.Л., Веснин А.В.</i> ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА.....                      | 156 |
| <i>Манкевич О.Д., Ровнейко И.В.</i> НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....                                                                                                                  | 158 |
| <i>Saukova Y.</i> THE MAIN PROVISIONS OF THE HIGH-RESOLUTION COLORIMETRY.....                                                                                                                                    | 160 |
| <i>Saukova Y., Alkhimovich M.</i> QUANTITATIVE RESEARCHES IN THE VISION TECHNICAL SYSTEMS WITH UNLIMITED NUMBER OF ENTRANCE AND OUTPUT MAGNITUDES.....                                                           | 162 |
| <i>Saukova Y., Alkhimovich M., Mirgorod Y.</i> RECOMMENDATIONS FOR THE DISPLAY AND ANALYSIS OF THE RESULTS OF MULTIPARAMETER RESEARCH IN HARDWARE AND SOFTWARE ENVIRONMENTS.....                                 | 164 |
| <i>Saukova Y., Zlobina U., Kuleshova A.</i> MODERN MODELS OF THE EXTENDED UNCERTAINTY AND THEIR APPLICATION IN INDUSTRIAL METROLOGY.....                                                                         | 166 |
| <i>Савкова Е.Н., Клевитская Е.Д.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ОАО «КРИНИЦА».....                                                                             | 167 |
| <i>Сергиевич О.А., Дятлова Е.М., Карниевич А.А. Сернов С.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ ТИПА RO НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ ..... | 169 |
| <i>Бужан И.А., Серенков П.С.</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА ПУТЕМ ПРИВЛЕЧЕНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ФОКУС-ГРУППЫ ИЗ ЧИСЛА ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН.....                          | 171 |
| <i>Серенков П.С., Герасимёнок Е.М.</i> ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....                                                                                          | 173 |
| <i>Серенков П.С., Дубицкий Д.В.</i> КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛАБОРАТОРИИ.....                       | 175 |
| <i>Кондратович А.Н., Серенков П.С.</i> НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АККРЕДИТАЦИИ ПРОВАЙДЕРОВ ПРОВЕРКИ КВАЛИФИКАЦИИ ЛАБОРАТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....                                                       | 177 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Серенков П.С., Гуревич В.Л., Мовламов В.Р.: Етумян А.С.</i> <b>РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНЫХ РАБОТ</b>                                                   | 179 |
| <i>Серенков П.С., Гуревич В.Л., Мовламов В.Р.: Етумян А.С.</i> <b>МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОГНЕЗАЩИТЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                                                                 | 180 |
| <i>Серенков П.С., Романчак В.М., Сацукевич А.А., Басинюк В.Л.</i> <b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ</b>                                                       | 182 |
| <i>Серенков П.С., Рудницкий Ф.И., Сацукевич А.А., Романчак В.М.</i> <b>СТРАТЕГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ КОМПЛЕКСА ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ</b>            | 184 |
| <i>Серенков П.С., Солодухо Ю.А.</i> <b>СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭТАПЫ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА</b>                                                                                                                            | 186 |
| <i>Соломахо В.Л., Соколовский С.С., Денисов Н.Г.</i> <b>ИСПЫТАНИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>                                                                                   | 188 |
| <i>Романов А.Ф., Ходасевич А.И., Чернобай И.А.</i> <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКОГО АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ</b>                                     | 190 |
| <i>Хомич О.А., Киселёв М.Г.</i> <b>МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МЕР ВМЕСТИМОСТИ СТЕКЛЯННЫХ</b>                                                                                                                  | 191 |
| <i>Цапенко В.В., Терещенко Н.Ф.</i> <b>КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА</b>                                                                                                 | 193 |
| <i>Беляев Ю.В., Цикман И.М., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Попков А.П.</i> <b>МЕТОДИКА ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК КОСМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ</b>                                  | 195 |
| <i>Цитович Б.В., Соколовский С.С.</i> <b>ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАНДАРТИЗОВАННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ</b>                                                                              | 197 |
| <i>Карпович И.А., Лебедев В.И., Молчанов А.Г., Солодуха В.А., Оджаев В.Б., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Черный В.В.</i> <b>ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ МАСЕЛ</b>                  | 199 |
| <i>Шабанов М.В., Разумный А.И.</i> <b>О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ УСТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СФЕРЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b>                      | 201 |
| <i>Шмигирёв Е.Ф., Юхник А.А.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАРТФОНОВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРИ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ ОБЪЕКТОВ</b>                                                                        | 205 |
| <i>Вольнец А.С.</i> <b>ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ЭТАЛОННЫХ АНТЕНН НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НЭ РБ 26-15 МЕТОДОМ ТРЕХ АНТЕНН</b> | 207 |
| <b>Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>                                                                                                     |     |
| <i>Батурин А.П., Терещенко Н.Ф.</i> <b>ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ РЕОГРАФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА</b>                                                                            | 211 |
| <i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.</i> <b>СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ С НИТЕВИДНЫМИ И SMD ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ</b>                                                                  | 212 |
| <i>Вириченко А.А., Безуглая Н.В.</i> <b>МОНТЕ-КАРЛО СИМУЛЯЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОСВЕТЛЕНИИ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА</b>                                                              | 214 |
| <i>Воронков Р.О., Безуглый М.А.</i> <b>ОПТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАТОЛОГИЧЕСКИ ИЗМЕНЁННЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ЗЕРКАЛЬНЫХ ЭЛЛИПСОИДОВ ВРАЩЕНИЯ</b>                                                                         | 216 |
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Березняк В.Д.</i> <b>УСТРОЙСТВО ОЦЕНКИ ОСТРОТЫ ОСТРИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИГЛ</b>                                                                                                            | 218 |
| <i>Беляев Б.И., Казак А.А., Кучинский П.В., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д.</i> <b>СОЗДАНИЕ МАЛОМАССОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ</b>                                                           | 220 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Рыжевич А.А., Балыкин И.В., Мащенко А.Г., Смирнов А.Г. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРОФИЛОМЕТРА С НАКЛОННЫМ ПАДЕНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА</b>                                                                    | 222 |
| <b>Самиляк А.Б., Безуглый М.А. ФОТОМЕТРИЯ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ СВЕТОРАССЕЯНИЯ КОЖЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОСВЕТЛЕНИИ</b>                                                                                                       | 224 |
| <b>Киселёв М.Г., Монич С.Г., Семенович В.П., Кучинская О.В. УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ОСТРОТЫ ОСТРИЯ ИНЪЕКЦИОННЫХ ИГЛ</b>                                                                                                              | 226 |
| <b>Сернов С.П., Балохонов Д.В. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОЛОВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА</b>                                                 | 227 |
| <b>Телеш Е.В., Дуксин М.В. ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>/C ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ SiO<sub>2</sub>/C</b>                                                                                                | 229 |
| <b>Фильчук А.С., Воропай Е.В., Козерук А.С., Кузнецик В.О. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОТОЧНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ</b> | 231 |
| <b>Чавченко К.Б. АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ МИНИМИЗАЦИИ ИНВЕРСНОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИИ ТКАНЕЙ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ</b>                                                                                      | 232 |
| <b>Навицкий А.Н., Чекан Н.М., Акула И.П., Щербакова Е.Н. АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОТОПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ</b>                                                 | 234 |
| <b>Анисович А.Г., Маркевич М.И., Чапанов А.М., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н. ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗАЛЬТОВУЮ ТКАНЬ</b>                                                                                               | 236 |
| <b>Бурак В.А. ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ 40Х</b>                                                                                      | 238 |
| <b>Бельский Д.В., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Тихон О.И., Лушакова М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КРЕМНИЕВЫМИ ПЛАСТИНАМИ НА СКОРОСТЬ СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК</b>                     | 240 |
| <b>Биткаша В.С., Юрасова К.В., Хомич Н.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА</b>                                                                 | 241 |
| <b>Киселев М.Г., Богдан П.С., Ничипорук А.С. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛИВОВ МЕТАЛЛА НА ШТРИПСЕ НА ПРОЦЕСС МИКРОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                           | 243 |
| <b>Киселев М.Г., Богдан П.С., Сидоров К.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛИВОВ МЕТАЛЛА НА ШТРИПСЕ НА ПРОЦЕСС МИКРОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                         | 245 |
| <b>Божко А.И. Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Лушакова М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА В N<sub>2</sub> В ТРУБЧАТОМ ЭЛЕКТРОДЕ</b>                                                       | 247 |
| <b>Борздов А.В., Борздов В.М., Кучинский П.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В СУБМИКРОННОМ КРЕМНИЕВОМ ДИОДЕ С p-n ПЕРЕХОДОМ</b>                                                                                        | 249 |
| <b>Волкеништейн С.С., Антончик Л.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ</b>                                                                              | 251 |
| <b>Волкеништейн С.С., Босак В.И., Кузьмар И.И., Хмыль А.А. ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ УДА В КЭП РЕЖУЩИХ ДИСКОВ</b>                                                                                                      | 253 |
| <b>Волкеништейн С.С., Керенцев А.Ф., Хмыль А.А. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОЩНЫХ ДМОП ТРАНЗИСТОРОВ</b>                                                                                                                                | 254 |
| <b>Voloshko O.V., Vysloukh S.P. COMPUTER MODELING OF DETAILS' ELASTIC STATE</b>                                                                                                                                                  | 256 |
| <b>Гайдук Ю.С., Реутская О.Г., Натаров В.О., Савицкий А.А. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                                    | 258 |
| <b>Головач Р.В., Дятлова Е.М., Сергиевич О.А., Шеченок А.А., Шамкалович В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА ОРТОФЕРРИТА ВИСМУТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ</b>          | 260 |



|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Гольцев М.В., Белая О.Н., Иванов А.А., Шепелевич В.Г., Гусакова С.В.</i> <b>МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ ОЛОВО-СВИНЕЦ, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ</b> .....                | 262 |
| <i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г., Гусакова С.В.</i> <b>ВРЕМЕННАЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СПЛАВА Sn-Zn-Bi-In</b> .....                                                                                    | 264 |
| <i>Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В.</i> <b>МИКРОСТРУКТУРА ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ</b> .....                                                                                           | 266 |
| <i>Дедович Н.Н., Романов А.Ф.</i> <b>РАЗРАБОТКА АППАРАТА ДЛЯ МАГНИТОУЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРАПИИ</b> .....                                                                                                                                   | 267 |
| <i>Дятлова Е.М., Сергиевич О.А., Алексеенко И.А., Шеченок А.А., Колонтаева Т.В</i> <b>ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРО- И ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ САМОГЛАЗУРУЮЩИХСЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....                                         | 269 |
| <i>Дятлова Е.М., Колонтаева Т.В., Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Белугин Д.С., Ильина Л.С.</i> <b>ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ</b> .....                               | 271 |
| <i>Жевняк О.Г.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ</b> .....                                                                                                           | 273 |
| <i>Захаров И.А., Касьяник А.В., Хомич Н.С.</i> <b>МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr-Ni</b> .....                                                                                                 | 275 |
| <i>Захарчук Ю.В.</i> <b>ИЗГИБ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ</b> .....                                                                                                                                                      | 277 |
| <i>Есман А.К., Зыков Г.Л., Потачиц В.А.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ CuInSe<sub>2</sub></b> .....                                                                                                  | 279 |
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Лобан Ю.А.</i> <b>УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЯ СЛЕПОЧНОГО МАТЕРИАЛА, ПРИМЕНЯЕМОГО В СТОМАТОЛОГИИ</b> .....                                                                                    | 280 |
| <i>Будай А.Г., Кныш В.П., Кучинский П.В., Малый С.В., Орлова А.С.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОПРОЗРАЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕНОК С АРМИРУЮЩИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ</b> .....                     | 282 |
| <i>Князев М.А.</i> <b>УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ТИПА WOBBLING KINK В ТЕОРИИ <math>\phi^4</math> ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЯ</b> .....                                                                                                   | 284 |
| <i>Ковынёв Н.В.</i> <b>ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА КОЧА ДЛЯ СОКРЫТИЯ ДАННЫХ В QR-КОД</b> .....                                                                                                                                    | 286 |
| <i>Козел А.Г.</i> <b>ИЗГИБ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ КРУГОВОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ НА СЛОЖНОМ ОСНОВАНИИ</b> .....                                                                                                                             | 287 |
| <i>Козловский А.Л., Гладких Т.М., Здоровец М.В.</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИТРИДНЫХ КЕРАМИК</b> .....                                                                                                                 | 289 |
| <i>Короткевич З.М., Осипов А.А., Счастный А.С.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВЕДЕННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ</b> ..... | 290 |
| <i>Кравченко А.Ю., Терещенко Н.Ф.</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ</b> ....                                                                                        | 292 |
| <i>Углов В.В., Дραπεзо А.П., Колесникова Е.А., Кулешов А.К., Русальский Д.П.</i> <b>МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРА ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ (InSb), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ</b> .....        | 294 |
| <i>Луговая И.С.</i> <b>ПОРШНЕВЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ</b> .....                                                                                                                                         | 296 |
| <i>Луговой В.П.</i> <b>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В ЮВЕЛИРНОЙ ОТРАСЛИ</b> .....                                                                                                                                                   | 297 |
| <i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Соболев Д.Е.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИТИНОЛА</b> .....                                                                                           | 298 |
| <i>Минченя В.Т., Савченко А.Л., Адзерихо И.Э.</i> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УПРУГО-ЭЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОСУДОВ</b> ...                                                                            | 300 |
| <i>Киселев М.Г., Габец В.Л., Монич С.Г.</i> <b>УСТРОЙСТВО ИСПЫТАНИЯ ОЧКОВЫХ ОПРАВ</b> .....                                                                                                                                            | 202 |
| <i>Киселев М.Г., Габец В.Л., Монич С.Г.</i> <b>УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ГОЛОВКИ ЗУБНЫХ БОРОВ БЕСКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ</b> .....                                                                                            | 304 |
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Антонов М.В.</i> <b>УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЕМКОСТИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖИДКОСТЯМИ</b> .....                                                                      | 305 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Кучинская О.В., Анишиц А.А.</i> КОМПЛЕКС УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПРОЧНОСТИ ТРУБКИ ИНЪЕКЦИОННЫХ ИГЛ.....                                               | 307 |
| <i>Киселев М.Г., Монич С.Г., Лобан Ю.А.</i> УСТРОЙСТВО ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ГОЛОВКИ С ТРУБКОЙ ИНЪЕКЦИОННОЙ ИГЛЫ.....                                                                   | 309 |
| <i>Муравьев А.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В МИКРО-ЭЛЕКТРОНИКЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИСПЛЕЕВ.....                                                                                   | 311 |
| <i>Щетникович К.Г., Окопчук Я.В., Судникович К.А.</i> ИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ МЕЖДУ ДВУМЯ ДИСКАМИ И СОСТАВНЫМ КОЛЬЦОМ.....                                                            | 313 |
| <i>Оцена М.</i> МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ И АНАЛИЗУ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ЗАКАЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....              | 315 |
| <i>Полещук Н.Н., Рудницкий А.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ.....                                                    | 317 |
| <i>Дятлова Е.М., Шамкалович В.И., Попов Р.Ю., Мухлядо В.И.</i> ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ.....                                                               | 318 |
| <i>Потапенко Е.А., Монич С.Г.</i> МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ С ИМИТАТОРОМ КОСТНОЙ ТКАНИ.....                    | 320 |
| <i>Савич В.В.</i> МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ.....                                                                                  | 322 |
| <i>Сандомирский С.Г.</i> РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЧАСТНЫХ ПЕТЛЯХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА.....                                                                       | 324 |
| <i>Сердюк В.М., Титовицкий И.А.</i> МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ПЛОТНОСТИ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕМНЫХ СВЧ РЕЗОНАТОРОВ.....                                             | 326 |
| <i>Степаненко Д.А., Емельянова А.С., Плескач М.А., Солодкая Н.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ.....                                                         | 328 |
| <i>Щетникович К.А., Судникович К.А., Окопчук Я.В.</i> КОЛЬЦЕВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.....                                                                    | 329 |
| <i>Счастный А.С., Короткевич З.М., Бурак В.А., Осипов А.А.</i> ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 9ХФМ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ.....                                          | 331 |
| <i>Телеш Е.В., Лам Н.Н.</i> ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК ИЗ TiV <sub>2</sub> + 20 % TiC ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННОЙ МИШЕНИ.....                                             | 333 |
| <i>Уласюк Н.Н., Сычик В.А.</i> КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ.....                                                                                                                       | 334 |
| <i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Глухманчук В.В.</i> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....                                                                                             | 336 |
| <i>Уласюк Н.Н., Сычик В.А.</i> ЭТАЛОННЫЕ СВОЙСТВА ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ.....                                                                                                                         | 338 |
| <i>Фельдштейн Е., Лексыцки К.</i> МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti6Al4V.....                                                  | 340 |
| <i>Filonenko K.G., Vysloukh S.P.</i> MODELING OF MANUFACTURING PROCESSES USING A RETRI-NET.....                                                                                                 | 343 |
| <i>Шепелевич В.Г., Русак Г.А., Росихин М.И.</i> ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТРОЙНОГО СПЛАВА In <sub>41</sub> Sn <sub>27</sub> Bi <sub>32</sub> .....                                                         | 345 |
| <i>Анисович А.Г., Маркевич М.И., Чапланов А.М., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНИ МЕТОДАМИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО МИКРОАНАЛИЗА..... | 346 |
| <i>Юрасова К.В., Биткаша В.С., Хомич Н.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ДО И ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ.....                                                         | 348 |

#### Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

|                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.</i> АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ШАГА ЛИНЗОВОГО РАСТРА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОГРАФИИ.....                                                                                           | 350 |
| <i>Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.</i> УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК..... | 352 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ксенофонтов М.А., Поляков А.В., Сырель А.В.</i> ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА.....                                                                                                                                                                                              | 353 |
| <i>Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.</i> МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МГНОВЕННОЙ ГИПЕРСПЕКТРОСКОПИИ.....                                                                                                                                                                                            | 356 |
| <i>Гусакова Н.В., Демеш М.П., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Choi S.Y., Rotermund F., Павлюк А.А., Кулешов Н.В.</i> ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ МИКРОЧИП ЛАЗЕРА ИЗЛУЧАЮЩЕГО В ОБЛАСТИ 2 МКМ С ЗАТВОРОМ НА ОСНОВЕ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....                                                                           | 358 |
| <i>Манего С.А.</i> ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ С МАЛЫМ ТЕЛОМ СВЕЧЕНИЯ.....                                                                                                                                                                                                                                      | 360 |
| <i>Савицкий А.А., Натаров В.О., Гайдук Ю.С., Хорт А.А., Лойко П.А., Паньков В.В.</i> ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.....                                                                                                                                                  | 362 |
| <i>Свирина Л.П.</i> КИРАЛЬНАЯ И АКИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ.....                                                                                                                                                                                                                                         | 363 |
| <i>Вилейшикова Е.В., Лойко П.А., Дымищ О.С., Маляревич А.М., Юмашев К.В.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТИЙ-АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ ОРТОНИОБАТОВ, АКТИВИРОВАННЫМИ ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ.....                                                                                                 | 365 |
| <i>Глазунов И.В., Скопцов Н.А., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В., Дымищ О.С., Жилин А.А., Алексеева И.П.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ ЛИТИЕВОАЛЮМОГАЛЛИЕВОЙ ШПИНЕЛИ С ИОНАМИ КОБАЛЬТА.....                                                                                     | 367 |
| <i>Дернович О.П., Курильчик С.В., Вилейшикова Е.В., Кисель В.Э., Кулешов Н.В., Кравцов А.В., Гурецкий С.А., Колесова И.М.</i> РОСТ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ДВОЙНОГО ВОЛЬФРАМАТА С ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ.....                                                                                              | 369 |
| <i>V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, K.N. Gorbachenya, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, and N.V. Kuleshov</i> Yb:YAB BASED CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER.....                                                                                                                                                                           | 371 |
| <i>Артюхина Н.К., Чернавчиц Д.А., Самбрано Л.Ф., Клочко Т.Р.</i> МЕТОД ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКИ ДЛЯ ГАБАРИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ.....                                                                                                                                                                                          | 373 |
| <i>Скопцов Н.А., Лойко П.А., Юмашев К.В., Yang Shi, Chunqing Gao, Qing Ye, Shuo Wang, Qing Wang, Mingwei Gao, Дымищ О.С., Жилин А.А., Запалова С.С.</i> ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ Er:YAG С ЗАТВОРОМ ИЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОКРИСТАЛЛЫ Co <sup>2+</sup> :γ-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... | 375 |
| <i>Филонова М.И., Козерук А.С., Мальтика Л.Д.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ МЕЖДУ ЗАГОТОВКОЙ И ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКЕ ЛИНЗ.....                                                                                                                                                                             | 377 |
| <i>Судникевич В.В., Фёдорцев Р.В.</i> АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОДИОДНАЯ ПОДСВЕТКА ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....                                                                                                                                                                                                      | 378 |
| <i>Ясюкевич А.С., Демеш М.П., Гусакова Н.В., Дернович О.П., Кулешов Н.В., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЫХ НЕОДИМОВЫХ ФТОРИДНЫХ СТЕКОЛ С НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ ФОСФАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....                                                                                                  | 380 |
| <i>Ясюкевич А.С., Демеш М.П., Гусакова Н.В., Дернович О.П., Кулешов Н.В., Рачковская Г.Е.</i> СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛОМАТЕРИАЛОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТУЛИЯ.....                                                                                                                                   | 382 |
| <i>Кузьмин В.И., Кисель В.Э., Фёдорцев Р.В., Власенко Е.П.</i> СИСТЕМА ЮСТИРОВКИ И ВАРИАНТ КОНСТРУКЦИИ РЕЗОНАТОРА МИНИАТЮРНОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ.....                                                                                                                                                 | 384 |
| <i>Звонкович А.В., Фёдорцев Р.В.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКА АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛА.....                                                                                                                                                           | 386 |
| <i>Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕЛЕСКОПА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ.....                                                                                                                                                                                                | 388 |
| <i>Соснина Л.А., Вяжевич Г.И., Кузнецов А.В., Фёдорцев Р.В.</i> СЕРВОПРИВОД ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПАЛЬЦЕВ БИОНИЧЕСКОЙ РУКИ.....                                                                                                                                                                                                 | 390 |
| <i>Ракевич П.С., Фёдорцев Р.В., Змитрович И.И., Фуфаев А.В.</i> МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИЦЕЛА ТП-1 «ARGUS IR».....                                                                                                                                                                             | 392 |

|                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Седун Д.Н., Фёдорцев Р.В. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕДАЛИ ЗВУКОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭНКОДЕРА</b>                                                                                   | 394 |
| <b>Силле Куэнка А.Р., Фёдорцев Р.В. ОРБИТАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ</b>                                                                                       | 396 |
| <b>Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. ТОЧНОСТЬ КРОСКОРЕЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ</b>                                                                                   | 398 |
| <b>Федорцев В.А., Власенко Е.П. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ</b>                                                                                                        | 400 |
| <b>Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК</b>       | 402 |
| <b>P. Loiko, S. Ghanbari, V. Matrossov, K. Yumashev, A. Major ANISOTROPY OF THERMO-OPTICAL COEFFICIENTS OF ALEXANDRITE LASER CRYSTAL</b>                                                                                                 | 404 |
| <b>Маляренко Д.Ю., Безуглая Н.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ МУТНЫХ СРЕД МЕТОДАМИ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ</b>                                                                                                   | 406 |
| <b>Шмендель О. Г., Терещенко Н.Ф. СРАВНЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН НА РАЗНЫЕ ТИПЫ КОЖИ</b>                                                                                                                  | 408 |
| <b>Гелич И.В. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОГО РЕФЛЕКТОРА НА ОСВЕЩЕННОСТЬ В ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ</b>                                                                                                              | 410 |
| <b>J.M. Serres, V. Jambunathan, P. Loiko, X. Mateos, H. Yu, H. Zhang, J. Liu, A. Lucianetti, T. Mocek, K. Yumashev, U. Griebner, V. Petrov, M. Aguiló, F. Díaz CONTINUOUS-WAVE MICROCHIP LASER OPERATION OF Yb-DOPED GALLIUM GARNETS</b> | 412 |

**Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ  
ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Афанасенко А.В. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРКЕТИНГОВОЙ СТРАТЕГИИ</b>                                                                       | 415 |
| <b>Акунец В.П., Зысь Т.А. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ И КРЕАТИВНАЯ ЭКОНОМИКА</b>                                                                                            | 416 |
| <b>Бондарев В.В. СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЙ БАЗЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТА ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</b>                                                       | 418 |
| <b>Мелюшин П.В., Бондаренок А.А. ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО ПОЛОЖЕНИЯ В СФЕРЕ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ И ВТОРИЧНЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b> | 420 |
| <b>Будинайте Е.Е. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ</b>                                                                                                                 | 421 |
| <b>Гайдус Е.А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНОВОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ</b>                                                                                                             | 423 |
| <b>Гао Хан НОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОДУКЦИИ В КНР - ЧЖЭЦЯНСКИЙ КОММЕРЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ</b>                         | 425 |
| <b>Гурина Е.В. ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА</b>                                                                                     | 426 |
| <b>Гурко А.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА</b>                                                                                                  | 428 |
| <b>Козленкова О.В., Овсяник Е.В. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА НА МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ФИНАНСОВОЙ ОТЧЁТНОСТИ</b>                                                  | 430 |
| <b>Лукьяненко А.Ю., Мелюшин П.В., Гурина Е.В. ПЕРЕХОД РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ К ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ</b>                                                                            | 431 |
| <b>Лукьяненко А.Ю. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СУБЪЕКТОМ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b>                                                    | 433 |
| <b>Ляхевич А.Г. ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ</b>                                             | 435 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Козленкова О.В., Мархель К.М., Сычёв Д.Р.</i> РЕКУПЕРАЦИЯ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ ПРЕДПРИЯТИЯ.....                                     | 437 |
| <i>Гурина Е.В., Матюта О.А., Комолов М.</i> ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ.....                          | 439 |
| <i>Мелюшин П.В.</i> НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....                                                                   | 441 |
| <i>Кондратьева Н.А., Мелешко А.Н., Канашевич Т.Н.</i> ТЕСТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРЕПОДАВАНИИ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ.....                 | 442 |
| <i>Кондратьева Н.А., Прихач Н.К., Прусова И.В.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.....             | 444 |
| <i>Гундина М.А., Кондратьева Н.А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ К ОЛИМПИАДАМ. РАЗДЕЛ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ».....                              | 446 |
| <i>Гундина М.А.</i> УЧЕТ РАЗУПРОЧНЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ.....                                                                                       | 448 |
| <i>Гурина Е.В., Михновец Д.Л., Петрович Е.Н.</i> ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЕРЕХОДА ОРГАНИЗАЦИИ НА АУТСОРСИНГ.....                                            | 450 |
| <i>Абдыев А.Д., Гундина М.А.</i> СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ.....                                                                                              | 452 |
| <i>Оганезов И.А., Атаев С.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....                                                           | 453 |
| <i>Козленкова О.В., Прикота Е.С.</i> РОЛЬ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ.....                                                             | 455 |
| <i>Серченя Т.И.</i> СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ, ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА.....                                                                    | 456 |
| <i>Серченя Т.И., Завацкая Д.С., Данилевич Е.Д.</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА СТРАНЫ.....                                          | 458 |
| <i>Серченя Т.И., Ляшук О.В.</i> ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ.....                                                                       | 460 |
| <i>Гурина Е.В., Скурковина М.М.</i> ПОНЯТИЕ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ.....                                       | 462 |
| <i>Гурина Е.В., Сологуб А.А., Рубан А.А.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ЦЕНООБРАЗОВАНИЮ.....                                                                       | 463 |
| <i>Третьякова Е.С., Третьяков-Савич Е.С.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ МАРКЕТИНГА КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ..... | 465 |
| <i>Гурина Е.В., Урбанович В.Р., Агапова А.И.</i> БЕНЧМАРКИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....                                  | 467 |
| <i>Гурина Е.В., Чайка Л.А.</i> ВЛИЯНИЕ ИННОВАЦИОННОСТИ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....                                                 | 468 |
| <i>Абдыев А.Д., Гундина М.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИКИ.....                                           | 469 |
| <i>Козленкова О.В., Юденко Н.С.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАЛОГОВОГО КОНТРОЛЯ.....                                                                                | 470 |
| <i>Серченя Т.И., Юхневич О.А.</i> ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНАНСОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....                                                       | 471 |
| <i>Мещеракова Е.В., Тулекбаева А.К., Кузьмич Д.А.</i> ПЕРСОНАЛ: ПРЕОДОЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМ.....                                                     | 473 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

УДК 535.317; 681.7

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАНКРАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА ИЗ ТРЕХ КОМПОНЕНТОВ**  
**Шкадаревич А.П.<sup>1</sup>, Артюхина Н.К.<sup>2</sup>, Чернавчиц Д.А.<sup>2</sup>, Альмахмуд Шуаиб Хассан<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>НТЦ «Лазеры в экологии, медицине и технологиях» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Al-Bath University, Al-Bath, Syria

В настоящее время широкое распространение получили оптические системы (ОС) переменного увеличения, позволяющие изменять поле зрения путем перемены относительных положений компонентов. Такая оптика имеет ряд функциональных преимуществ. Современные разработки активно используются в военно-технической сфере и других областях. Существует классификация таких ОС: вариобъективы, трансфокаторы, объективы с механической и оптической компенсацией изображения [1, 2].

В работе рассмотрена новая модель трехкомпонентной системы панкратического объектива с подвижным первым компонентом (рисунок 1).

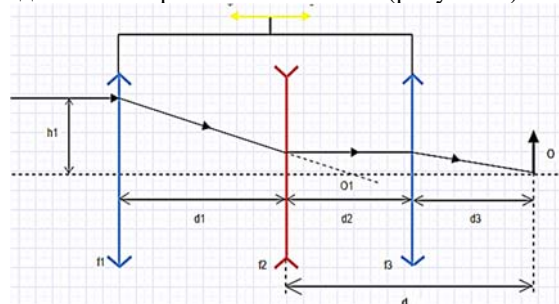


Рисунок 1 – Оптическая схема трехкомпонентного объектива переменного увеличения

Основная композиция представлена тремя компонентами, два из которых подвижны. Исследованы схемы объективов с механической и оптической компенсацией изображения. Установлено, что композиция с подвижным первым компонентом обеспечивает малые габариты.

Рассмотрим основную композицию, в которой второй компонент фиксирован; положение его определено расстоянием между его главной плоскостью и плоскостью изображения:  $d = d_2 + d_3$ .

На первом этапе структурного анализа была определена композиция оптической схемы объектива и ее основные характеристики (значение перепада увеличения и диапазон изменения фокусного расстояния), а также такие параметры, как число компонентов; фокусные расстояния и закон движения компонентов, определяющий расстояния между ними, величина осевого смещения плоскости изображения. На втором этапе – конструктивные параметры ОС, которые позволяют получить необходимые абберационные характеристики: число и тип отдельных компонентов (склейка, триплет и т.д.), показатели преломления материалов, радиусы кривизны поверхностей и толщины

линз, расстояния между линзами, параметры асферических поверхностей.

Предложенный алгоритм расчета основан на формулах, определяющих:

– параксиальный отрезок до плоскости Гаусса

$$a' = (1 - \beta)f';$$

– расстояние от неподвижного компонента 2

$$d = (1 - \beta_2)f_2' + (2 - \beta_3 - \frac{1}{\beta_3})f_3';$$

– связь увеличений для компонентов 2 и 3

$$\beta_3 = \frac{f'}{f_1' \cdot \beta_2};$$

– осевые расстояния

$$d_2 = (f_1' - \beta_2 \cdot f_2' \cdot f_1'^2 + f_2'), \quad d_3 = (1 - \beta_3) \cdot f_3'; \quad (1)$$

– линейное увеличение  $\beta_2$

$$(1 - \beta_2)f_2' + (2 - \frac{f'}{f_1' \cdot \beta_2} - f_1' \frac{\beta_2}{f'})f_3' - d = 0.$$

Получен закон движения компонентов (основное уравнение трехкомпонентной системы):

$$k_1\beta_2^2 + k_2\beta_2 + k_3 = 0, \quad (2)$$

где коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  определяются следующими формулами:  $k_3 = f_3' f'^2$ ;

$$k_1 = (f_1'^2 f_3' + f_1' f_2' f'); \quad k_2 = (f_2' + 2f_3' - d)f_1' f'.$$

Из возможных решений уравнения (2) только одно дает практический результат с положительными по знаку расстояниями  $d_2$  и  $d_3$ .

Параметрический синтез завершается определением параметра  $d_1$ . На основании предложенных формул выбраны параметры композиции с подвижным первым компонентом и дан расчет конструктивных параметров панкратического объектива из трех компонентов.

Для проектного расчета был выбран трехкомпонентный объектив (первый и третий компонент подвижные) с механической компенсацией. Рассчитанный панкратический объектив обеспечивает перепад фокусных расстояний  $f'$  от 70 до 160мм и развивает относительное отверстие  $D/f'$  в пределах 1:2 – 1:6 при угловом поле зрения  $2\omega = 4^\circ - 2^\circ$  при удовлетворительном качестве изображения по полю изображения.

Результаты габаритного расчета одной из конструктивных композиций, сведены в таблицу, где  $\Delta$  – смешение изображения от нулевого состояния.

При расчете радиусов кривизны поверхностей линз отдельных компонентов и введении конечных

толщин для различных комбинаций стекол были использованы наиболее эффективные методики расчета [3, 4].

Таблица – Результаты параметрического синтеза для четырех положений

| $f'$ , мм | $\beta_2$ | $d_1$ , мм | $d_2$ , мм | $L$ , мм | $\Delta$ , мм |
|-----------|-----------|------------|------------|----------|---------------|
| 70        | 0,389     | 17,19      | 33,35      | 67,16    | 0             |
| 90        | 0,444     | 41,080     | 24,2       | 91,25    | 0,025         |
| 110       | 0,498     | 59,39      | 18,19      | 109,44   | -0,032        |
| 160       | 0,598     | 84,6       | 7,11       | 130      | 0,099         |

К примеру, рассчитанный первый компонент по методике [4] с оптическими характеристиками: фокусное расстояние  $f' = 135$  мм, диафрагменное число  $f'/D = 3,75$  обеспечивает совершенную коррекцию сферической аберрации и комы 3-го порядка.

| Система |          | Работа-RT |        |        |        | Снар-0 View 13:36 OPAL-PC |        |
|---------|----------|-----------|--------|--------|--------|---------------------------|--------|
| N       | S1       | S2        | S3     | S4     | S5     | S1xp                      | S2xp   |
| 1       | 94233    | -58790    | 36677  | 56953  | -58361 | -00903                    | 00000  |
| 2       | -3.54175 | -88641    | -22185 | -16941 | -09786 | 03362                     | 00032  |
| 3       | 2.58741  | 1.46168   | 82573  | 32964  | 65242  | -02466                    | -00045 |
| sum     | -01201   | -01263    | 97066  | 72976  | -02905 | -00007                    | -00012 |

Рисунок 2 – Суммы Зейделя для первого компонента

Компьютерное моделирование данного объектива в программной среде Орал показало, что объектив обладает допустимыми значениями осевых и внеосевых аберраций ( $2\omega = 4^\circ$ ) для всего диапазона изменения фокусного расстояния (70-145 мм).

Отметим, что получена ортоскопическая коррекция аберраций (величина относительной дисторсии во всех позициях не превышает 1%).

Установлено, что базовые композиции трехкомпонентной системы панкратического объектива, рассчитанные в диапазоне фокусных расстояний  $f' = 160-70$  мм при относительном отверстии  $D/f' = 1:2$ , поле зрения  $2\omega = 40^\circ$ , обладают минимальными значениями неизопланатизма и сферической аберрации, а также допустимыми значениями волновой аберрации и астигматической разности в спектральном диапазоне  $\lambda = 380...680$  нм.

УДК 06.35.27

## ON THE METHODOLOGY OF SUPPORTING MAINTENANCE DEPARTMENT WORK AT A STRATEGIC LEVEL USING MES INFORMATION SYSTEM Patalas-Maliszewska J., Skrzyszewska M.

University of Zielona Góra, Poland

Employees within the maintenance department in a manufacturing company, especially at the strategic level, have to use innovative methods and tools, in order to work in accordance with the company's development strategy. The tool, that supports the execution of business processes at the operational level and also at the strategic level may be the information system, namely Manufacturing Execution System (MES).

Providing research in the area of the effective use of the MES system in the maintenance department at the strategic level is important due to need the company's management regarding knowledge about the cur-

Объективы ахроматизованы при заданной спектральной эффективности.

Полученные формулы для трехкомпонентной системы можно успешно использовать для расчета композиций из четырех и пяти компонентов. Для расчета сложных систем переменного увеличения были использованы некоторые теоретические положения метода гауссовых скобок [5].

Область применения предложенной методики можно расширить не только по количеству компонентов, но и для объективов дискретного типа. В этом случае в алгоритме будут изменения в законах движения компонентов, были получены необходимые дополнительные формулы. Расчет объектива с дискретным изменением фокусного расстояния представляет значительный интерес. На основании предложенных формул выполнен расчет объектива дискретного типа с десятикратным перепадом. Проведено габаритное моделирование объектива дискретного типа с перепадом  $10^x$ - базовую схему, которую можно использовать при проектном расчете объектива, работающим в ИК области или для других применений.

### Литература

- Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М.: Логос, 2000.
- Clerk, A.D. Zoom lenses / A.D. Clerk. – London, 1973.
- Antonin, M. Method of zoom lens design / M.Antonin, P. Novak // Applied optics journal – 2008. – V.47, No 32.
- Кириченко, Е.В. Принцип построения ОС из бесконечно тонких компонентов /Е.В. Кириченко // Оптико-механическая промышленность. – 1978. С. 17–23.
- Herzberger, M. Gaussian Optics and Gaussian brackets / M. Herzberger // Journal of the optical society of America. 1943. – V.33 – P. 615-625.

rently state of computerization and automation of the enterprise. The effective use of the MES system may enable further activities in the company related to production automation and also can be the first element of enterprise development according with the Industry 4.0 concept.

The MES system supports the execution of production processes and at the same time it is used to support activities carried out in the maintenance department within the production company.

MES systems enable effective collection of data and information in real time from production business

processes and their transfer to other processes realised within the enterprise. Data and information on production can be collected directly from machines and from employees working in the production department. The MES system also performs functions of the Supervisory Control and Data Acquisitions System, that can be defined as the unified interface to production controllers and to autonomous industrial systems [1].

The use of selected functionalities of the MES system by the managers of the maintenance department enables the effective obtainment of data and information in real time, e.g. data and information about the realisation of the machine repairs, machine downtime, about the current irregularities occurring during the production process, which are particularly important for the efficiency of maintenance work in a production enterprise. According to [2], the main functions of the MES system are defined as:

- allocation and status of resources,
- sending products,
- data collection i acquisition,
- quality management,
- maintenance management,
- repairs management,
- results analysis,
- scheduling,
- document controlling,
- personnel management,
- process management,
- product tracking.

Among the MES systems offered for Polish manufacturing companies, we can distinguish among others: Wonderware, Queris, ProSeS BDE, PSImes, BPSC or CMMS. Each IT system supports specific activities performed in a production company, including also carried out in the maintenance department at the strategic and also at the operational level.

The analysis of the use of the MES system at the strategic level in the maintenance department was carried out assuming that the defined activities are carried out by the head of the maintenance department within eight hours of work. The head of the maintenance department supervises the work of 13 employees who serve 380 machines throughout the production enterprise. Production is carried out in the company in two-shift mode.

For analysis of the use of the MES system by employees at the strategic level in the maintenance department in the Polish manufacturing company of the automotive industry, the specific activities are defined which are performed using the MES system.

The partly activities are:

- order management,
- reporting the demand for external service,
- planning downtime,
- monitoring/tracking schedule/production planning,
- identification of bottlenecks on each device,

- review of technical documentation,
- conducting on-line/video training,
- reporting of readiness for work of repaired (after overhaul) devices/machines,
- training planning,
- monitoring of trainings,
- human resources planning,
- creating procedures,
- reporting/signaling improvement solutions (e.g. modernization, improvement of devices),
- reporting/signaling solutions to improve work (e.g. information flow),
- implementing improvement solutions (e.g. modernization, improvement of devices),
- implementing solutions that improve work (e.g. information flow),
- monitoring of technical tests of equipment / machines,
- monitoring MTTR indicator (Mean Time To Repair),  $MTTR = \text{failure time}/\text{number of corrective events (min)}$ ,
- monitoring MTTF indicator (Mean Time to Failures),  $MTTF = (\text{available working time} - \text{failure time})/\text{number of events (min)}$ ,
- monitoring MTBF indicator (Mean Time Between Failure),  $MTBF = MTTR + MTTF$ ,
- analysis of the availability of the device,
- analysis of costs in the maintenance department,
- archiving data.

The completely activities are:

- tracking the status of devices in real time,
- checking the availability of parts in the warehouse,
- reporting the demand for parts/consumables,
- recording of withdrawal of equipment / machines from service,
- generating reports for machines or devices,
- signalling equipment/machine downtime,
- signalling/informing about the readiness of equipment/machines/production line.

The use of the MES system in the maintenance department mainly supports only partly the work at the strategic level. Activities that are fully performed using the MES system are 24.14% of all activities carried out by employees at the strategic level in the maintenance department within 8 hours of daily work (Fig. 1).

Activities performed in the maintenance department at the strategic level using completely the MES information system within 8 hours of work mainly concern tracking the production schedule and order management. When analyzing the time that takes up activities performed in the maintenance department using completely the MES information system, it can be concluded that almost 60% i.e. about 5 hours of work, is supported by information technology. This means that the information system actually supports activities at the strategic level in the maintenance department (Fig. 2), which are performed during a given working day.



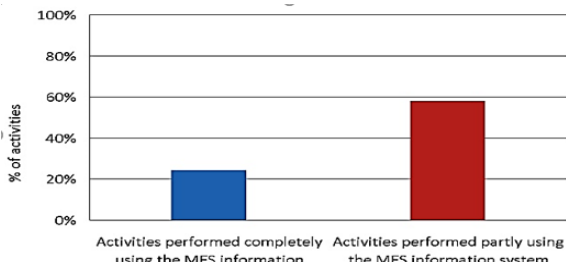


Figure 1 – Activities performed in the maintenance department at the strategic level using the MES information system within 8 hours of work

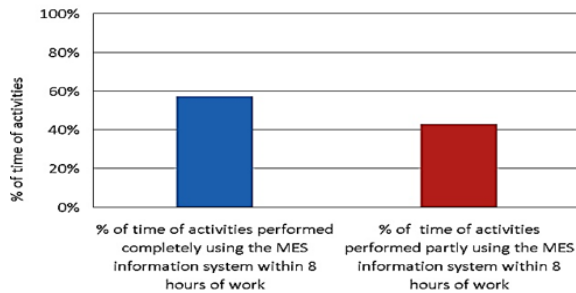


Figure 2 – The time of activities performed in the maintenance department at the strategic level using the MES information system within 8 hours of work

Knowing that the effective use of the MES information system can enable automation of production according with the Industry 4.0 concept, research was also conducted on the use of the MES information system at the strategic level during a given work month and during a given year. In a given month/year, the maintenance department manager performs also activities that are not supported by the MES system:

- entering the records on the inspection of equipment/ machines,
- entering the records of testing/tuning devices/machines,
- registering parts/consumables for equipment/ machines,
- monitoring repair of equipment/machines,
- recording/making a selection from the list of actions performed,
- entering the write-up for devices/machines,
- simulation of retooling devices, machines/ production lines,
- informing about failure/blockade,
- notification by SMS or E-mail about a planned preventive maintenance, repair,
- generating a manual alarm on failure,
- generating an alarm automatically about a failure,
- notification by SMS / E-mail about a failure,
- running a repair calendar,
- access from console to the desktop of another level,
- monitoring OEE indicator (Overall Equipment Effectiveness),
- recording accidents by work.

Figs. 3 and 4 present the results of the analysis of the use of the MES information system during the month and during the year in the maintenance department at the strategic level.

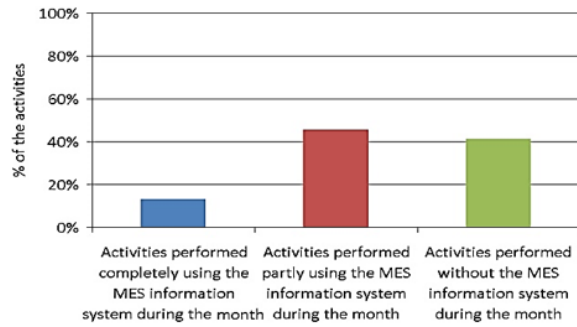


Figure 3 – The activities performed in the maintenance department at the strategic level during the month

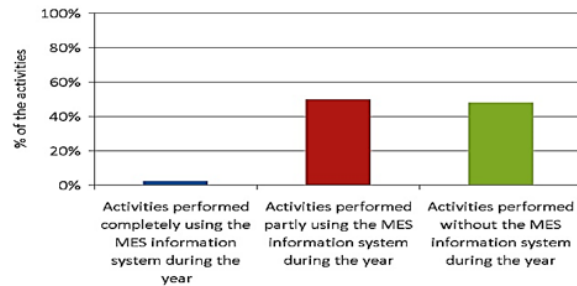


Figure 4 – The activities performed in the maintenance department at the strategic level during the year

Analyzing the activities performed in the maintenance department at the strategic level within a month, it can be noticed that the majority of activities of about 50% are partly supported by the MES system, while the fully supported works by the system is only 13.05%, and works performed completely without system support, up to 41.3%.

However, analyzing, activities carried out also at the strategic level, but during the year, there is a decrease the efficiency of the MES system application - it is only 2.17% of operations performed entirely using the system, still partially supported by the system is at the 50% limit, while activities performed without the help of the system is 47.83%.

Based on the research carried out in the maintenance department related to the use of the MES information system at the strategic level, it was found that still only a few activities performed by the manager during the year are supported by information technology. These are activities related to planning and scheduling human resources. The results of the analysis, which concern everyday activities, have shown the efficiency of using the MES system (Figs 1 and 2), but these are not the key activities at the strategic level of the maintenance department manager. Knowing that the maintenance department supports 380 machines in a production company and that work related to real-time device/machine status tracking during the year are among the most important activities at the strategic level and are not supported by the information system, it was found that the production company presented is unfortunately not prepared to implement the concept of industry 4.0. The concept of industry 4.0 assumes the implementation of IT-assisted relationships between employees, objects and systems through the exchange of data and information in real time [3, 4].

In order to be able to implement the objectives of the Industry 4.0 concept, manufacturing companies should make investments in IT technologies supporting the execution of processes (activities), because IT systems are the basis for further investments in smart technologies. The transition to “level 4.0” also requires large investments in supplementing the knowledge of managers and engineers to implement and use the IT technologies supporting production processes.

### References

1. Patalas-Maliszewska J., Skrzyszewska M. Model rozwoju przedsiębiorstwa produkcyjnego w

kontekście koncepcji Industry 4.0 /Przedsiębiorczość i Zarządzanie, 2017, vol.18 (12), pp. 177–196.

2. Younus M., Hu L., Yong Y., Yuqing F. Realization of Manufacturing Execution System for a Batched Process Manufacturing Industry/ Proceedings of the Int. MultiConf. of Engineers and Computer Scientists, 2009, vol. 2, pp. 1337–1341.

3. Dorst W., Glohr C., Hahn T., Knafla F., Loewen U., Rosen R. Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0 – Frankfurt/Main: BITKOM e.V. – 2015. – 100 pp.

4. Spath D., Ganschar O., Gerlach S., Hämmerle M., Krause T., Schlund S. Produktionsarbeit der Zukunft Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013, 155 pp.

УДК 535.317:621.783.323

### ГРАДИЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЫМОМЕРЫ

Виленчиц Б.Б., Попов В.К., Шаронов Г.В.

*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Загрязнение воздушной среды газовыми выбросами промышленных предприятий и транспортных средств постоянно увеличивается. В связи с этим весьма актуальна проблема оперативного контроля концентрации газовых выбросов. Создание надежных методов и средств экспресс-контроля газовых загрязнений является одной из проблем современного газоаналитического приборостроения. Основными вопросами непрерывного экспрессного анализа параметров сложных газовых систем являются определение локальных концентраций и полей концентраций движущихся сред, и одновременное определение концентраций и скоростей потоков.

Газоаналитические средства развиваются в двух вариантах: промышленном и лабораторном. Лабораторные средства анализа характеризуются более высокой чувствительностью и прецизионностью в силу условий их эксплуатации и предназначения. Производственные средства должны обеспечивать непрерывный и автоматический анализ газообразных сред в условиях длительной эксплуатации в экстремальных заводских и климатических условиях.

Количественный и качественный контроль указанных сред в большинстве случаев осуществляется с помощью локального газового анализа, который, в свою очередь, разделяют на две группы методов: контактные и бесконтактные. К первым относятся механические, тепловые, магнитные и др., которые требуют контакта зондирующего элемента с исследуемой средой. Ко вторым относятся те, которые нужную информацию получают путем взаимодействия электромагнитного излучения с газовой средой. В частности, по поглощению ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения.

Для локального анализа дымовых, пылевых и подобных им аэродисперсных потоков наибольшее распространение получили два метода: фильтрация и просвечивания. Метод фильтрации заключается в осаждении на фильтре путем пропускания через него исследуемого потока частичек пыли и

сажи с последующим измерением степени черноты фильтра оптическим способом. По такому принципу работают, например, дымомеры «Бош» (Германия), «Фон Бранд» (США), AVL (Австрия). Однако этот метод не является экспрессным и достаточно сложен в измерениях.

Метод просвечивания основан на измерении ослабления интенсивности светового пучка при прохождении его через диагностируемый поток. Подобный метод реализован в дымомерах «Вольво» (Швеция), «Утак» (Франция), «Хартридж» (Англия).

Способ экспрессный, относительно прост в реализации, но основной его недостаток – загрязнение оптических элементов измерительного тракта аэрозольными частицами – трудно преодолим.

Изучение и анализ мирового опыта разработки методов и средств исследования токсичных компонентов и дымности газообразных сред выявили следующие основные тенденции развития данной группы приборов:

- повышение метрологических характеристик приборов;
- создание полифункциональных многопараметрических приборов, основанных на модульно-блочном принципе построения;
- применение средств микроэлектроники, вычислительной техники, программного обеспечения;
- уменьшение массогабаритных характеристик создаваемых приборов.

Существенного повышения метрологической надежности газоаналитических измерений можно достичь, взяв за основу оптические методы, обладающие высокой чувствительностью и селективностью. Это обусловлено и тем, что оптические принципы измерения позволяют реализовывать полностью безинтрузивный анализ газовых сред. С помощью предложенных методов удалось значительно повысить точность измерений в условиях с ограниченными пространственными возможностями размещения измерительных устройств относительно

источников выбросов, а также при исследовании газовых выбросов с быстропеременной концентрацией частиц, при диагностике дымности отработавших газов движущегося транспортного средства и в других нестандартных ситуациях.

На этой основе разработаны оригинальные градиентно-фотометрические принципы построения газоаналитических средств исследований дымовых выбросов. Основанные на использовании вихревых и струйных эффектов для осуществления защиты и термостабилизации элементов оптического тракта средств измерений, они обеспечивают необходимую метрологическую надежность контроля.

Градиентно-фотометрические средства пригодны для исследования оптико-физических характеристик аэрозолей различной природы: дымовых, пылевых, масляных, кислотных и т.д. Однако практическая реализация указанных разработок требует конкретизации измеряемой характеристики, вида аэрозоля и условий эксплуатации прибора. Исходя из актуальности решения экологических проблем, преимущественное внимание было уделено решению одной из важнейших задач газоаналитического приборостроения – созданию портативных устройств для измерения дымности газовых выбросов промышленных производств и технических средств.

Оптические анализаторы дымности, работающие на принципе просвечивания, можно описать с помощью соотношения:  $D = (1 - K_{пр}) 100\%$ , где  $D$  – дымность потока;  $K_{пр} = \exp(-K_{ос}L)$  – коэффициент пропускания;  $K_{ос}$  – коэффициент оптического излучения;  $L$  – толщина исследуемой среды.

Как видно, требуется измерение мощности коллимированного светового пучка, проходящего через исследуемую среду толщиной  $L$ . По величине дымности легко определяется коэффициент ослабления оптического излучения:  $K_{ос} = -1/L \ln(1 - D/100)$ .

Зная его связь с концентрацией частиц, можно определить последнюю. Если выполняется закон Бугера, то эта связь носит линейный характер  $K_{ос} = K_c N$ , где  $K_c$  – коэффициент связи;  $N$  – массовая концентрация частиц. Таким образом, анализаторы дыма могут быть градуированы в единицах, определяющих величины  $D$ ,  $K_{ос}$  и  $N$ .

Обзор существующих отечественных и зарубежных аналогов и анализ возникающих при эксплуатации приборов проблем показывают, что разрабатываемые дымомеры должны отвечать следующим общим требованиям:

– возможность измерения дымности в реальных скоростных режимах течения потоков;

– высокая метрологическая надежность;  
– высокая метрологическая надежность;  
– приемлемые габаритные размеры, масса, энергопотребление; удобство в использовании и простота метрологического обеспечения.

Учет всего изложенного и моделирование процессов диагностирования различных источников дыма приводят к выбору функциональной схемы разрабатываемых приборов, состоящей из двух основных элементов: оптического детектора и электронно-измерительного блока.

Оптический детектор служит для преобразования энергии светового зондирующего пучка в электрический сигнал, а также для формирования градиентов термодинамических параметров исследуемого потока с целью обеспечения постоянства фотометрической базы и надежной защиты элементов оптического тракта от загрязнений.

Для эффективной реализации отмеченных свойств детектора выбрана однолучевая фотометрическая схема зондирования с поперечным просвечиванием исследуемого потока.

Электронно-измерительный блок предназначен для усиления и обработки электрического сигнала детектора и индикации дымности.

Анализ газоаналитических ситуаций и статистические данные опроса потенциальных потребителей анализаторов дыма показали, что для удовлетворения практических нужд необходимы различные модели дымомеров:

– стационарные – для постоянного контроля за технологическими процессами и их управлением, используемые на испытательных и исследовательских стендах и т. д.;

– переносные – для периодического контроля за параметрами технологических процессов;

– портативные – для служб санэпидстанций, природоохранных учреждений;

– мобильные – для непрерывного экспресс-контроля дымности газовых выбросов движущихся источников (автомобилей, самолетов и др.).

В результате создан класс оригинальных градиентно-оптических портативных дымомеров, две модели из которых, ДО-1 и ИД-1, освоены в серийном производстве. Они нашли и получают практическое применение при решении широкого класса экологических, аналитических, метрологических задач, в проблемах глобального мониторинга, в системах автоматического управления, регулирования и контроля промышленных производств и технических средств.

УДК 535-3, 535.314

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА ЦИФРОВОЙ ПИНХОЛ-КАМЕРОЙ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Крютень О.В.

*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Для получения изображения объекта в обратно-рассеянных рентгеновских лучах его сканируют уз-

конаправленным рентгеновским пучком, а рассеянное излучение регистрируется детектором, который

располагается со стороны источника излучения [1]. Поскольку сканирование требует применение механических устройств и системы синхронизации, перспективным видится разработка систем, в которых изображение объекта в рентгеновских лучах регистрируется с использованием двумерных ПЗС-камер и элементов рентгеновской оптики [2].

Основная проблема здесь состоит в том, что изображающие элементы рентгеновской оптики, такие как многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы и зонные пластинки имеют небольшую апертуру около 100–200 мкм. Поэтому единственным возможным решением проблемы – это использовать пинхол-камеру. Под пинхол-камерой понимается система, содержащая пинхол (отверстие в поглощающем излучение материале) и цифровую ПЗС камеру со сцинтиллятором, расположенную на заданном расстоянии от пинхола [3]. Диаметр отверстия камеры может быть выбран относительно произвольно, например, равным 0,5–1 мм.

Ранее в [2] нами была показана принципиальная возможность получения изображения объектов в обратнорассеянных лучах с использованием пинхол-камеры. Неясным остался вопрос об интенсивности обратнорассеянного рентгеновского пучка от материалов, различающихся порядковым номером. Хотя этот вопрос детально освещен в литературе [4], на практике вопрос об определении интенсивности обратнорассеянного пучка с использованием пинхол-камеры фактически не рассматривался.

Нами разработана и апробирована система для определения интенсивности обратнорассеянного рентгеновского излучения от различных материалов с использованием цифровой пинхол-камеры.

Структурная схема установки показана на рис. 1.

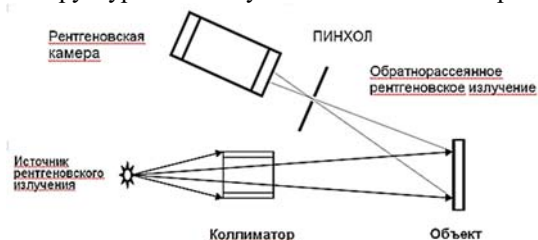


Рисунок 1 – Структурная схема стенда измерения интенсивности обратнорассеянного рентгеновского излучения пинхол-камерой

В состав установки входят источник рентгеновского излучения, коллиматор, пинхол, цифровая рентгеновская камера. Фотография стенда регистрации обратнорассеянного рентгеновского излучения пинхол-камерой показана на рисунке 2.

Рентгеновское излучение от источника проходит через коллиматор и попадает на исследуемый объект. Диаметр пятна рентгеновского излучения на объекте составляет 6 мм. Пинхол формирует изображение облучаемой области объекта на цифровой рентгеновской камере в обратнорассеянных рентгеновских лучах.

В качестве источника рентгеновских лучей нами использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с

медным анодом. Рабочее напряжение на аноде трубки – регулируется от 10 до 40 кВ, анодный ток – от 2 до 14 мА. В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения использовалась ПЗС камера фирмы Photonic Science (модель FDI VHR). Камера содержит ПЗС-матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным сцинтиллятором. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18 x 12 мм<sup>2</sup>, число пикселей равно 4008 x 2670. Размер пикселя камеры составляет 4,5 мкм. При съемке объекта использовалась функция биннинга, которая позволяет объединять несколько пикселей камеры в один. Сигнал, от выделенных пикселей суммируется. Использовалось значение биннинга, равное 8, что соответствует эффективному значению размера пикселя 36 мкм.

Изображения поверхности различных образцов в обратнорассеянном рентгеновском излучении показаны на рисунке 3. В качестве образцов использовались пластины из железа, дюралюминия, свинца и пластика. Напряжение на рентгеновской трубке составляло 32 кэВ. Образцы располагались на расстоянии 35 мм от коллиматора рентгеновского излучения. Пинхол-камера располагалась на расстоянии 40 мм от образца.



1 – рентгеновская камера; 2 - источник рентгеновского излучения; 3 – пинхол; 4 - коллиматор рентгеновского излучения; 5 - объект исследования

Рисунок 2 – Фотография стенда регистрации обратнорассеянного рентгеновского излучения пинхол-камерой

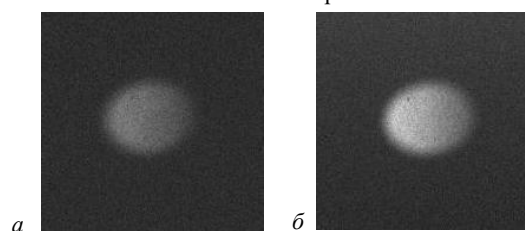


Рисунок 3 - Изображения поверхности образцов в обратнорассеянном рентгеновском излучении (а – пластик, б – железо)

Таблица 1 – Интенсивность обратнорассеянного излучения при облучении образцов коллимированным пучком рентгеновского излучения

| № п/п | Наименование материала | Интенсивность обратнорассеянного рентгеновского пучка, отн. ед. |
|-------|------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1.    | Дюралюминий            | 66                                                              |
| 2.    | Свинец                 | 68                                                              |
| 3.    | Пластик                | 120                                                             |
| 4.    | Железо                 | 190                                                             |

Построены графики распределения интенсивности обратнорассеянного излучения в зоне облучения объекта. Установлена зависимость интенсивности обратнорассеянного рентгеновского излучения от материала образца при его облучении рентгеновским излучением.

Полученные данные приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что интенсивность обратнорассеянного излучения выше от материалов с меньшим порядковым номером.

Исключение составляет железо, что связано с рентгеновской флуоресценцией атомов, которые эффективно поглощают излучения от рентгеновской трубки с медным анодом.

### Литература

1. Сканер для получения изображения объектов в обратнорассеянных рентгеновских лучах / Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, П.В. Кучинский,

А.Н. Новик, М.И. Новик, И.В. Белый, Крекоть О.В. // Материалы девятой Международной научно-технической конференции Приборостроение-2016 – Минск, БНТУ, 2017 – С. 50– 51.

2. Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, Ю.К. Ломашко. Получение изображения объектов во вторичных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры. Приборы и методы измерений» 2016, т. 7, № 2, стр. 14-18.

3 Дудчик, Ю.И. Получение изображения источников рентгеновского излучения с использованием пинхол камеры [Текст] / Ю.И.Дудчик, И.Ю. Звягин // Материалы 6-ой Межд. научно-техн. конференции «Приборостроение -2013» БНТУ. – Минск, 2013. – С. 290 – 292.

4. В.А.Забродский. Применение обратнорассеянного рентгеновского излучения в промышленности. – М.:Энергоатомиздат, 1989. –120 с.

УДК 004.056:061.68

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ КОНТЕЙНЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛОВ С ППРЧ

Бокуть Л.В.<sup>1</sup>, Деев Н.А.<sup>2</sup>

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь  
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Методы скремблирования и стеганографии относятся к перспективным направлениям защиты информации. Суть методов заключается в незначительной одновременной модификации целого ряда определенных битов контейнера при сокрытии одного бита информации.

В стеганографических методах исходный сигнал модулируется высокочастотной псевдослучайной последовательностью  $W(t)$ , которая определена на области значений  $\{-1,1\}$ . Результирующий стегосигнал представляет собой суммарный сигнал контейнерной составляющей  $V(t)$  и скрываемых данных  $D(t)$ :

$$S(t)=V(t)+\alpha \cdot D(t) \cdot W(t),$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания, предназначенный для выбора оптимального уровня шума, который вносится данными. Для извлечения скрытых данных  $D(t)$  на принимающей стороне необходимо иметь ту же самую псевдослучайную импульсную последовательность  $W(t)$ , обеспечив ее синхронизацию со стегосигналом:

$$S(t)W(t)=V(t)W(t)+\alpha D(t).$$

Рассматривается система передачи с фазовой информационной манипуляцией сигнала и межбитовой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). В качестве контейнерной составляющей  $V(t)$  в этом случае служат узкополосные ЧМ-сигналы, а скрываемые данные  $D(t)$  передаются на фоне сигнала распределенные по диапазону и модулированные с помощью межсимвольной ППРЧ.

Оценка контейнерной составляющей (типа узкополосных ЧМ-сигналов  $y_j(t)$ ) может быть существенно повышена за счёт введения адаптивного

компенсатора контейнерной составляющей (АКК) (рис.1) в каждый из каналов устройства обработки (УО) (рис.2). Процесс обнаружения контейнерной составляющей и оценки её параметров осуществляется во время паузы в частотном канале. При этом сигнал не оказывает влияния на ошибки оценивания контейнерной составляющей, что обеспечивает существенное увеличение отношения информационного сигнала и контейнерной составляющей на выходе АКК, превышающее 0 дБ.

Коммутатор адаптивных компенсаторов контейнерных составляющих в каналах приёма осуществляется в соответствии с синхронизированной ПСП. Оценка амплитуды  $\alpha_{ni}^*$  контейнерной составляющей осуществляется в течение времени, пока полезный сигнал скрываемых данных  $D(t)$  в  $i$ -м подканале отсутствует. Характеристика АКК  $i$ -го подканала определяется соотношением:

$$Z_i(y_i) = k \cdot \frac{d \ln W_y(y_i)}{dy_i}, \quad (1)$$

где  $W_y(y_i)$  – плотность распределения вероятности (ПРВ) мгновенных значений контейнерной составляющей  $\ell n y_i$ .

Во время включения  $i$ -го подканала  $g_i = 1$  на вход вычитателя АКК поступает оценка контейнерной составляющей с амплитудой  $a_{ni}^*$ , сформированной на предыдущем интервале  $T_g$ . Полосовые фильтры (ПФ) на входе АКК обеспечивают селекцию контейнерной составляющей и исключают одновременное действие более одного сигнала ЧМ в частотном канале. Выходные ПФ необ-

ходимы для подавления нечётных гармонических составляющих, образующихся в результате нелинейного преобразования контейнерной составляющей  $\text{sign}(y)$ . Оценка амплитуды  $a_n^*$  контейнерной составляющей осуществляется в устройстве оценки контейнерной составляющей (УОК). Компенсация контейнерной составляющей осуществляется во время подключения частотного канала сигналом  $g(t - \tau^*)$  от ГПСП приёмника.

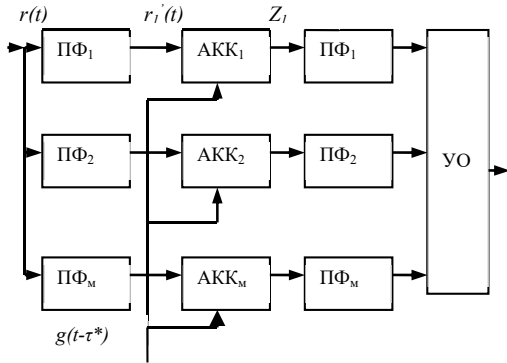


Рисунок 1 – Схема включения АКК

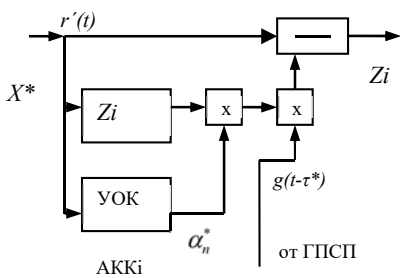


Рисунок 2 – Структура АКК<sub>i</sub> компенсации контейнерной составляющей *i*-го подканала

Если контейнерная составляющая представляет модулированное колебание (например, узкополосное частотно-модулированное), то ПРВ его мгновенных значений имеет бимодальный характер, что может быть учтено при построении нелинейного преобразователя (НП). Оценённые узкополосные контейнерные составляющие компенсируются в вычитающем устройстве.

Рассмотрим пример построения компенсатора, задавшись конкретными статистическими характеристиками преобразуемых процессов. Примем ПРВ суммы контейнерных составляющих  $y_i$  и гауссовского шума  $n_{oi}$  в виде бимодальной функции, обусловленной действием контейнерного узкополосного частотно-модулированного сигнала с амплитудой  $a_i$  и шумовой составляющей с дисперсией  $\sigma_i^2$ :

$$W_y(y_{oi}) = C \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2}(y_{oi} - a_i \text{sign}(y_{oi}))^2\right], \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная нормировки;  $\sigma_i^2$  – дисперсия шумовой составляющей подканала.

В соответствии с (2) и (3) получим:

$$Z_i(y_i) = k \cdot (y_i - a_i^* \text{sign}(y_i)). \quad (3)$$

Принимая независимыми сечения случайного процесса  $\{r_{ij}\}, j = \overline{1, k}$ , взятые с дискретом  $\Delta t = T/k$ , вычислим логарифм отношения правдоподобия. На интервале  $T_m$  определяем максимально правдоподобную оценку контейнерной составляющей  $\alpha_i^*$ . Максимально правдоподобная оценка моды  $\alpha_i^*$  определяется формулой

$$\alpha_i^* = \frac{1}{T} \int_0^T |r_i(t)| dt. \quad (4)$$

В соответствии с (3) и (4) определяем характеристику нелинейного преобразования  $Z_{oi}(r)$  в *i*-м канале оценки контейнерной составляющей:

$$Z_{oi}(r_i) = \frac{1}{T} \int_0^T |r_i(t)| dt \cdot \text{sign}(r_i(t)). \quad (5)$$

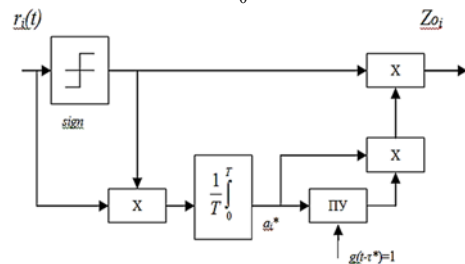


Рисунок 3 - Структурная схема нелинейного оценщика контейнерной составляющей *i*-го частотного подканала

Характеристика  $Z_{oi}(\cdot)$  обеспечивает инвариантность преобразования к частоте контейнерной составляющей. Вместе с тем при клипировании смеси  $r_i(t)$  в спектре появляются составляющие на частотах  $\omega_i(2n-1), n \geq 2, 3, \dots$ . Эти составляющие спектра на частотах вне полосы ПФ<sub>*i*</sub> подавляются, обеспечивая снижение ошибки оценивания контейнерной составляющей  $y_i^*(t)$ .

Показателем качества компенсации может служить коэффициент подавления контейнерной составляющей  $\mu^2$  на выходе компенсатора, определяемый соотношением

$$\mu_i^2 = \frac{1 + \alpha_i^2 / \sigma_i^2}{1 + \sigma_a^2 / \sigma_i^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_i^2$  – средняя мощность шумовой составляющей на выходе ПФ<sub>*i*</sub>;  $\sigma_a^2$  – дисперсия ошибки оценивания моды  $\alpha_i$ , при этом  $(\sigma_a^2 \leq \sigma_i^2 2\tau_k / T)$ ,  $\tau_k$  – величина, зависящая от нормированной корреляционной функции  $\rho(t_1 - t_2)$  процесса  $y_i(t)$  и времени  $T$  интегрирования:  $\tau_k = \int_0^T \int_0^T \rho(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 \cdot (7)$

При относительно большом времени интегрирования  $T \gg \tau_k$  дисперсия  $\sigma_a^2$  оценки моды может быть снижена до требуемой величины.

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЗОННУЮ СТРУКТУРУ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ

Гацкевич Е.И.<sup>1</sup>, Малевич В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Как известно, германий является непрямозонным полупроводником и характеризуется сравнительно низкой эффективностью излучательной рекомбинации. В ряде работ [1,2] для увеличения квантового выхода люминесценции в данном полупроводнике были предложены два метода: деформация полупроводника под действием растягивающих напряжений и легирование донорной примесью с высокой концентрацией ( $>10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Под действием деформации растяжения в плоскости пленки энергии Г- и L- минимумов зоны проводимости понижаются. В германии из-за разных деформационных потенциалов энергия Г- долины понижается сильнее, чем энергия боковых L-долин, и при достаточно большой величине деформации полупроводник может стать прямозонным. Второй способ повышения эффективности излучательной рекомбинации основан на эффекте заполнения боковых L-долин равновесными электронами. Повышение уровня Ферми уменьшает вероятность переходов фотовозбужденных электронов из центральной в боковые L-долины и приводит к увеличению эффективности излучательной рекомбинации. В германии уровень Ферми достигает края зоны проводимости в Г-долине при концентрации донорной примеси  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Наносекундной лазерной обработкой тонкопленочного германия с высоким содержанием донорной примеси можно реализовать механически-напряженное состояние пленки, зависящее от уровня легирования, типа подложки и энергетического режима лазерного воздействия. Тем самым можно модифицировать зонную структуру полупроводника и повышать вероятность прямозонных переходов неравновесных электрон-дырочных пар. В процессе лазерного воздействия происходит плавление пленки германия и последующий ее эпитаксиальный рост из жидкой фазы. Преимущество данного метода по сравнению с термическим отжигом заключается в локальности.

В настоящей работе исследовано влияние деформаций, возникающих в структуре пленки германия - кремниевая подложка в процессе лазерной жидкофазной перекристаллизации, на зонный спектр германиевой пленки. Исходная структура, представляющая собой поликристаллическую пленку германия с толщиной порядка 1 мкм, нанесенную методом вакуумного напыления на кремниевую подложку, предполагается ненапряженной. В процессе лазерной перекристаллизации напряжения, возникающие из-за рассогласования постоянных решеток германия и кремния, снимаются путем

образования дислокаций несоответствия. Таким образом, главную роль в структуре пленки Ge-Si подложка будут играть термические напряжения, возникающие из-за разных коэффициентов теплового расширения в процессе остывания.

При воздействии на структуру 100 нс импульсом рубинового лазера (длина волны 0.69 мкм) глубина прогрева определяется длиной диффузии тепла за время импульса и составляет величину порядка 1–2 мкм. Поэтому в расчетах можно пренебрегать разогревом кремниевой подложки и считать, что температура пленки германия близка к точке плавления и однородна по толщине. В этом случае можно воспользоваться выражениями для расчета термических деформаций биметаллической пластины, полученными ранее в работах [3,4]. При используемых здесь приближениях выражения для упругих напряжений в пленке (1) и подложке (2) будут иметь следующий вид:

$$\sigma_1(z) = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{E_1' d_1^3 + E_2' d_2^3}{6d_1(d_1 + d_2)} + E_1' \left( \frac{d_1}{2} - z \right) \right], \quad (1)$$

$$\sigma_2(z) = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{E_1' d_1^3 + E_2' d_2^3}{6d_2(d_1 + d_2)} + E_2' \left( \frac{d_2}{2} + z \right) \right], \quad (2)$$

где ось  $z$  направлена перпендикулярно пленке ( $z > 0$ ), индекс “1” относится к пленке Ge, а “2” – к кремниевой подложке,  $E' = E(1 + \nu)$ ,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $d$  – толщина слоя. Радиус кривизны  $\rho$ , входящий в выражения (1, 2), определяется соотношением

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\alpha_1(T_m - T_0) \left( 1 + \frac{d_1}{d_2} \right)}{(d_1 + d_2) \left[ 3 \left( 1 + \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left( 1 + \frac{d_1 E_1'}{d_2 E_2'} \right) \left( \frac{d_1^2}{d_2^2} + \frac{d_2 E_1'}{d_1 E_2'} \right) \right]}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1 = 5.9 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> – коэффициент термического расширения германия,  $T_m = 1210$  К – температура плавления Ge,  $T_0 = 300$  К.

Формулы (1-3) при  $d_1/d_2 \ll 1$  существенно упрощаются и принимают вид

$$\sigma_1(z) = \alpha_1(T_m - T_0) E_1' \left[ 1 + \frac{6E_1' d_1}{E_2' d_2^2} \left( \frac{d_1}{2} - z \right) \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2(z) = -4\alpha_1(T_m - T_0) E_1' \frac{d_1}{d_2} \left( 1 + \frac{3z}{2d_2} \right) \quad (5)$$

Упругие напряжения рассчитывались по формулам (4,5) для следующих значений параметров:  $d_1 = 1$  мкм,  $d_2 = 100$  мкм,  $E_1' = 1.39 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>,  $E_2' = 1.76 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>. Из расчетов следует, что в германии формируются растягивающие латеральные напряжения, однородные по толщине пленки. После остывания структуры до комнатных температур величина этих напряжений составляет  $7.5 \cdot 10^9$

дин/см<sup>2</sup>. Из выражения (5) следует, что напряжение в подложке меняет знак в точке  $z = -0.66d_2$ , т. е. на расстоянии 66 мкм от границы пленки. Вблизи пленки в подложке формируется область сжатия, а при  $z > 66$  мкм – область растяжения. Выражение для напряжения в подложке содержит малый параметр  $d_1/d_2$  и, следовательно, его величина примерно на два порядка меньше напряжений в пленке.

Растягивающие напряжения в плоскости пленки приводят к сдвигу экстремумов зон, а также к снятию вырождения валентной зоны в Г-точке. Воспользуемся выражениями для энергетических зазоров между минимумом зоны проводимости в центральной долине и минимумами подзон тяжелых и легких дырок [5]:

$$E_g^T = E_g^T(\varepsilon_c = 0) + 2a \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right) \varepsilon_c \pm b \left(1 + \frac{2C_{12}}{C_{11}}\right) \varepsilon_c \quad (6)$$

где  $a = -8.97$  эВ и  $b = -1.88$  эВ – деформационные потенциалы германия,  $C_{11} = 128.53$  ГПа и  $C_{12} = 48.26$  ГПа постоянные упругой жесткости,  $\varepsilon_{||}$  – компонента латеральной деформации в плоскости пленки; знак “+” соответствует подзоне легких дырок, а “–” – тяжелых. Латеральная деформация рассчитывается из следующего выражения

$$\varepsilon_{||} = \frac{C_{11}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})} \sigma_1. \quad (7)$$

Подставляя в (7) рассчитанное ранее значение для термоупругих напряжений, находим  $\varepsilon_{||} \approx 0.053$ . При такой деформации, как следует из выражения (6), ширина прямой запрещенной зоны может уменьшаться до значения 0.3 эВ (в нормальных условиях 0.8 эВ).

Из проведенных расчетов следует, что при поверхностном характере нагрева под действием наносекундного лазерного излучения изменение ширины прямой запрещенной зоны пленки германия в структуре Ge/Si, обусловленное термическими напряжениями, примерно в  $\alpha_1/(\alpha_1 - \alpha_2) \approx 1.8$  раз превышает изменения ширины зоны в условиях однородного нагрева.

Расчётные данные показали, что термические напряжения, возникающие при облучении наносекундными лазерными импульсами тонкопленочного Ge на кремниевой подложке, приводят к модификации зонной структуры Ge, а именно, к сужению ширины запрещенной зоны, причём, изменение ширины запрещенной зоны при наносекундном лазерном нагреве существенно превышает изменения при однородном нагреве.

#### Литература

1. Sun, X. Direct gap photoluminescence of n-type tensile-strained Ge-on-Si / X. Sun [et al.] // Appl. Phys. Lett., 2009. – Vol. 95, iss.1. – P. 011911
2. Kurdi, M. El. Enhanced photoluminescence of heavily n-doped germanium / M. El Kurdi [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 94. –P. 191107.
3. Timoshenko S. Analysis of bi-metal thermostats / J. Opt. Soc. Amer., 1925, vol.11, pp. 233-255.
4. Tsui R.K., Gershenson M. Plastic deformation and fracture resulting from stresses caused by differential thermal contraction in GaP /Si heterostructures / Appl. Phys. Lett., 1980, vol. 37, pp. 218-220.
5. Deformation potential constants of biaxially tensile stressed Ge epitaxial films on Si.100/ J.Liu [et al.]. Phys. Rev. B.-2004.-V.70.-P. 155309.

УДК 614.842

### ТЕСТОВЫЙ ПОЖАР НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ, МОДЕЛИРУЮЩИЙ УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ТЛЕНИЯ В ПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ

Антошин А.А., Никитин В.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Известно, что мультикритериальные пожарные извещатели успешно внедряются во всем мире, так как способны обнаруживать пожар с высокой достоверностью. Отличие мультикритериального извещателя от комбинированного заключается в наличии у него сложного алгоритма обработки информации по сравнению с простой логикой «ИЛИ» у комбинированных пожарных извещателей [1].

В испытаниях пожарных извещателей широко используются тестовые пожары. В Европейских нормах используются шесть типов тестовых пожаров: TF1 – горение древесины, TF2 – тление древесины, TF3 – тление хлопка, TF4 – горение пенополиуретана, TF5 – горение гептана, TF6 – горение спирта [2] и [3], каждый из которых моделирует один тип горения, пламенной или тление, но с образованием дыма с разными характеристиками. В Российской Федерации разработан стандарт по

испытаниям мультикритериальных пожарных извещателей (ГОСТ Р 57552-2017), в котором используются тестовые пожары: ТП-1 (горение древесины), ТП-2 (тление древесины), ТП-3 (тление со свечением хлопка), ТП-4 (горение полимерных материалов), ТП-5 (горение легковоспламеняющейся жидкости с выделением дыма), ТП-8 (горение легковоспламеняющейся жидкости с выделением черного дыма). Однако и в этом случае каждый тестовый пожар моделирует один тип горения.

Хорошо известно, что пламенное горение твердых горючих материалов начинается с термического разложения, в результате которого образуются горючие газы, которые при нагреве воспламеняются. Процесс термического разложения материала может сопровождаться достаточно большим тепловыделением, что может привести к тлению. Тление при определенных условиях (большая кон-



центрация горючих газообразных продуктов горения и высокая температура) может перейти в пламенное горение. Однако обнаружение мультикритериальными пожарными извещателями пожаров, когда в начальной его стадии может наблюдаться переход тления в пламенное горение изучено недостаточно. В настоящее время не созданы научные основы для разработки тестовых пожаров, моделирующих такие пожары в лабораторных условиях проведения испытаний.

В данной работе исследовано изменение характеристик окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения. Измерялись концентрация угарного газа (СО), удельная оптическая плотность и поток оптического излучения, рассеянный на углы от одиннадцати до пятнадцати градусов, а также температура на нагревательной поверхности электроплитки и в двух точках на потолке испытательной камеры.

Исследования проводились в испытательной камере размером 2х2х2 метра с вытяжным каналом. В вытяжном канале устанавливаются датчики температуры, угарного газа и измерительная система для измерения оптических характеристик газоздушной среды. На полу испытательной камеры устанавливалась электроплитка, мощностью 2 кВт, диаметром 220 мм с восьмью концентрическими каналами глубиной 2 мм и шириной 5 мм каждая. Поверхность плиты нагревалась до 600 °С.

В качестве топлива для тестовых пожаров использовались образцы древесины с размерами, приведенными в таблице.

Таблица – Характеристики образцов топлива для тестовых пожаров

| № образца | Размеры, мм                   | Масса, г | Порода древесины |
|-----------|-------------------------------|----------|------------------|
| 1         | 2х10х75                       | 14       | ель              |
| 2         | 3,5х10х75                     | 13,7     | лиственница      |
| 3         | 6х10х75                       | 13,5     | лиственница      |
| 4         | 20х20х75                      | 11,5     | лиственница      |
| 5         | листы мятой бумаги формата А4 | 4,5      | –                |

В качестве средств измерения параметров окружающей среды при горении тестовых пожаров использовались: газоанализатор дымовых газов Multilyzer NG (с погрешностью 5 % от измеренной величины); измеритель регулятор «Сосна-004» с термоэлектрическим преобразователем ТХА(К)-1199, имеющего диапазон измерения от -50 °С до +500 °С и измерительный узел установки для измерения оптических характеристик дыма (удельной оптической плотности и величины потока оптического излучения, рассеянного частицами дыма). Электроплитка при включении постепенно нагревалась до максимальной температуры (около 600°С).

Результаты исследования изменения характеристик окружающей среды при нагреве образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец №1) приведены на рисунке 1. Увеличение потока рассе-

янного излучения и значения удельной оптической плотности наблюдались, начиная с 6 минуты при температуре на поверхности плиты 325 °С. Концентрация угарного газа при этом не превышала 10ppm вплоть до самовоспламенения на 630 секунде. Воспламенение образца наблюдалось при температуре поверхности плиты 420 °С. Увеличение потока рассеянного излучения и значения удельной оптической плотности наблюдались, начиная с 6-й минуты (при температуре на поверхности плиты 325 °С). После воспламенения образца увеличение потока оптического излучения, рассеянного дымом уменьшается при сохранении скорости увеличения удельной оптической плотности задымленной среды, что подтверждает тот факт, что при пламенном горении образующиеся более мелкие частицы дыма меньше рассеивают оптическое излучение.

Температура на потолке испытательной камеры изменялась слабо, достигая своего максимума (26,2 °С) за 1,5 минуты до воспламенения (9 мин). Угарный газ достиг своего максимального значения на 12 минуте спустя 2,5 минуты после воспламенения.

При нагревании образцов толщиной более двух миллиметров (№2-5) воспламенения не наблюдалось, но при этом обнаружена зависимость концентрации угарного газа от исходной толщины образца. Чем толще образец, тем позднее и при большей температуре на поверхности плиты появлялся угарный газ. Кроме того, замечено, что при появлении угарного газа температура у потолка испытательной камеры постепенно снижается.

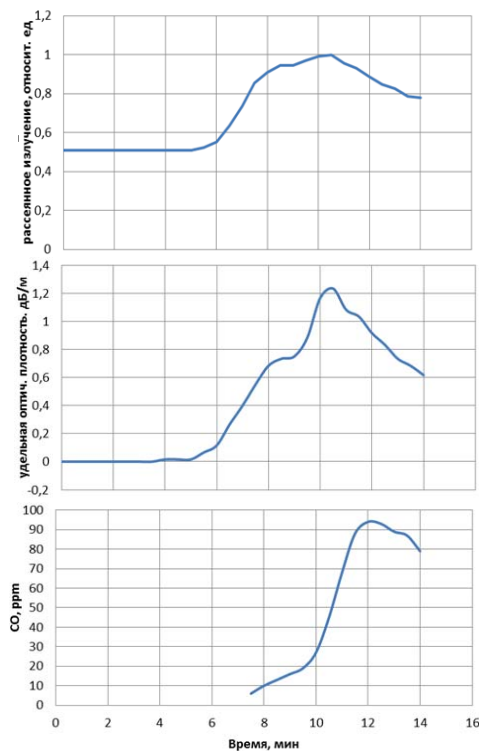


Рисунок 1 – Изменения рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа при нагреве деревянных брусочков размерами 2х10х75 мм

**Выводы.** Установлена зависимость удельной оптической плотности окружающей среды, рассеивающей способности образующегося при горении дыма и концентрации угарного газа, а также динамики их изменения от типа горения (тление или пламенное). При сложном алгоритме работы мультикритериального пожарного извещателя такие особенности изменения параметров окружающей среды могут привести к сбою в его работе.

Установлено, что для тестового пожара на основе древесины, имитирующего переходной процесс от тления к пламенному горению, необходимо принимать образцы толщиной не более 2 мм.

УДК 621.3.049

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ  
НА БАЗЕ СТРУКТУР С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ  
Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) являются элементной базой фотоприёмных устройств различного назначения. Основными параметрами ФЭПП являются динамический диапазон энергетической характеристики, спектральная чувствительность, быстродействие, зависящие от физических параметров полупроводникового материала. Для расширения динамического диапазона и управления спектральной чувствительностью ФЭПП с собственной фотопроводимостью предложено использовать многозарядные примеси в невысокой концентрации ( $<10^{14}$  см<sup>-3</sup>), формирующие несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне.

Особенностью создания структур для таких ФЭПП является требование высокой точности легирования и однородности распределения примеси по объему активной области полупроводника. Традиционные методы легирования при использовании быстродиффундирующих многозарядных примесей, такие как диффузия и ионная имплантация, не обеспечивают необходимую управляемость, точность (прецизионность) и однородность легирования. В связи с чем для создания таких структур был предложен метод твердофазного (плазменного) легирования с использованием лазерной плазмы или плазмы тлеющего разряда, отличающийся воспроизводимостью, экологичностью и прецизионностью легирования эпитаксиальных структур. Однако попытки введения цинка и меди в гидридном процессе газоразрядного легирования не увенчались успехом. Анализ возможных способов распыления твердотельных мишеней, характеризующихся определенными ограничениями на их проводимость и состояние образующейся при этом газовой атмосферы, указывает на целесообразность применения для легирования эпитаксиальных слоев кремния плазмы, формируемой при лазерном облучении мишени.

**Литература**

1. Членов А.Н., Буцынская Т.А., Журавлев С.Ю., Николаев В.А., Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т.25, № 12. – С. 55-60.
2. Баканов В. Мультикритериальные пожарные извещатели по российским и европейским стандартам // Технологии защиты. – 2014. – № 3.
3. Скорфилд С. Мультисенсор -эффективное решение проблемы ложных срабатываний систем пожарной сигнализации // Системы безопасности. – 2006. – № 5. – стр.128-13.

Исследования плазменного сгустка на ранних стадиях разлета показали, что в нем можно выделить три зоны, различающиеся плотностью частиц и характером газодинамического движения. На поверхности мишени формируется плотное ядро факела, поглощающее лазерное излучение. Затем следует зона ускорения, в которой происходит переход тепловой энергии плазмы в кинетическую энергию направленного газодинамического движения. Далее реализуется зона, в которой скорость движения частиц плазмы выходит на асимптотическое значение, а тепловая энергия плазмы существенно меньше энергии направленного движения. Поскольку интенсивным эмиттером ионов является, в первую очередь, область плотного горячего ядра, именно эта область и ее параметры представляют наибольший интерес. Выражения для оценки внутренней энергии  $E$  (Дж/кг), плотности  $\rho_m$  (кг/м<sup>3</sup>) и массы горячего ядра лазерной плазмы  $M$  (кг) в зависимости от мощности излучения  $W$  (Вт) и начального размера  $r_0$  (см) плазменного сгустка

$$E \approx 5,3 \cdot 10^8 K_0 r_0 W^{4/9},$$

$$\rho_m \approx 1,3 \cdot 10^{-5} K_0 r_0^{-1} W^{1/3},$$

$$M \approx 1,9 \cdot 10^{-6} K_0 t_n r_0^{2/3} W^{5/9},$$

где  $K_0 = z^3(z-1)^{9/2} \cdot A^{7/2}$ ,  $z$  - порядковый номер элемента,  $A$  - его атомная масса.

Как видно, в полученных соотношениях отсутствует зависимость величины  $E$ ,  $\rho_m$ ,  $M$  от вида химической связи между атомами мишени и такими ее параметрами, как температура плавления, теплопроводность, коэффициент поглощения. Определяющими являются мощность излучения и время воздействия лазерного импульса. Проведенное рассмотрение свойств плазмы, образованной действием мощного лазерного излучения на поверхности твердого тела показало, что лазерная плазма может быть использована в качестве источника ионов для синтеза соединений используемых при легировании эпитаксиальных структур глубо-

кими многозарядными примесями. Особенности лазерной плазмы, в первую очередь, определяются высокой скоростью ввода энергии излучения в вещество. При плотности потока излучения  $>10^9$  Вт/см<sup>2</sup> происходит бесфракционное испарение вещества и его лавинная ионизация со степенью близкой к 100 % вне зависимости от теплофизических свойств облучаемого вещества.

Расчеты показывают, что в случае мишени из меди или цинка количество ионов в ядре плазмы может достигать величины  $10^{16}$ - $10^{17}$  ионов в зависимости от энергии лазерного излучения и размера пятна фокусировки. В течение времени выращивания эпитаксиального слоя можно создать необходимое число ионов многозарядной примеси для легирования эпитаксиальной структуры в процессе роста. При формировании плазмы лазерным излучением снимается ограничение на величину электрической проводимости мишени, и, следовательно, существенно расширяется перечень материалов, доступных в технологии легирования структур ФЭПП многозарядными примесями, формирующих несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне. Кроме того, воздействие лазерной плазмы на поверхность материалов мишени позволяет осуществить плазмохимический синтез легирующих соединений.

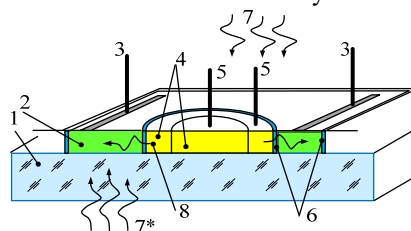
Данный способ лазерного легирования многозарядными примесями реализован в экспериментальной технологической установке, в которой использовался лазер с длиной волны излучения 1,064 мкм и частотой повторения импульсов в многомодовом режиме 12, 25 или 50 Гц. Оптическая система технологического реактора включает линзу (фокусное расстояние 10 см), полупрозрачное (10 %) зеркало для выделения части излучения и измеритель мощности лазерного излучения.

При выращивании эпитаксиальных структур кремния перед входом в реактор эпитаксиального наращивания смешиваются четыре потока:

- водород  $H_2$ ,
- $H_2 + SiCl_4$ ,
- $H_2$  + мелкая легирующая примесь,
- $H_2$  + многозарядная примесь.

Легирующая смесь с многозарядной примесью создается в реакционной камере путем воздействия излучения лазера на мишень, содержащую легирующий элемент (медь или цинк), при продувке зоны реакции водородом.

В хлоридном процессе эпитаксии при использовании мишеней из меди или цинка, облучаемых лазером, сформированы эпитаксиальные структуры кремния легированные цинком и фосфором, а также медью и фосфором, с концентрацией многозарядной примеси в диапазоне  $10^{13}$ - $2 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Затем на их основе созданы фоторезистивные структуры ФЭПП с собственной фотопроводимостью, в которых за счет введения глубокой многозарядной примеси удалось расширить динамический диапазон энергетической характеристики ФЭПП и реализовать переключение характеристики спектральной чувствительности (со сдвигом «красной границы» на 2-4 мкм) под воздействием дополнительного оптического излучения.



1 – сапфировая подложка, 2 – фоторезистивный ФЭПП на основе полупроводника с глубокой многозарядной примесью, 3 – выводы ФЭП, 4 – управляющий *p-n* светодиод, 5 – выводы светодиода, 6 – слои изолирующего диэлектрика, 7 – входной оптический сигнал, 8 – управляющее излучение

Рисунок 1 – Структура управляемого ФЭПП на сапфировой подложке

Отметим, что предложенная технология формирования полупроводниковых структур с низкой концентрацией примеси хорошо совмещается с «около кремниевыми» технологиями и структурами  $Si$ ,  $Si:Ge - A^3B^5$  на сафире. Одна из таких возможных совмещенных структур приведена на рисунке 1. Области 4 полупроводника типа  $A^3B^5$  формируют управляющий светодиод, а область 2 представляет управляемый многофункциональный ФЭПП. Рядом могут быть расположены элементы усилителей или коммутирующих, часто выполняемых по КМОП-технологии, устройств. Многофункциональные одноэлементные ФЭПП на основе полупроводников с собственной проводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе одновременное определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения.

УДК 512.624.95:378.147.091.3

## ЗАДАЧА ДИСКРЕТНОГО ЛОГАРИФМИРОВАНИЯ В КРИПТОГРАФИИ И ЕЕ МОДИФИКАЦИИ

Крупенкова Т.Г.<sup>1</sup>, Липницкий В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь  
<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Современная криптография своё рождение отсчитывает с 1976 года – с момента выхода в свет знаменитой статьи У. Диффи и М. Хелмана [1]. Основные идеи этой работы были революционны-

ми, крайне актуальными и своевременными в вопросах защиты информации. А именно, возможность открытого обмена ключами, построение криптографических систем на основе односторон-

них функций, применение в криптосистемах открытых ключей, идея цифровой подписи электронных документов. Авторы предложили двух кандидатов на роль односторонних функций: факторизация натурального числа на большие простые множители и задачу дискретного логарифма. Последняя заключается в решении уравнения

$$b^x = a \quad (1)$$

в поле классов вычетов  $GF(p)$  для больших  $p$ .

Обе односторонние функции нашли широчайшее применение в современной криптографии, как в алгоритмах защиты информации, так и в протоколах цифровой подписи. Задача дискретного логарифмирования оказалась весьма эффективной в реализации (см. криптосистема Эль Гамала [2] и многие национальные стандарты шифрования на её основе) и крайне неудобной и вязкой для прямого переборного взлома. Активная исследовательская работа привела к открытию, переоткрытию и/или нахождению в старых секретных лабораториях различных подходов к проблеме дискретного логарифма: метода «baby step giant step» [2] и его модификации [3], метода НСПХ или метода Нечаева-Силвера-Полига-Хелмана [4], а по сути, метода разложения абелевой конечной группы в прямое произведение циклических подгрупп примарных порядков, метода Шнорра. Эти методы приучили разработчиков к осторожному формированию криптосистем на основе данной задачи, к выбору  $p$  с обязательным большим простым делителем  $q$  числа  $p-1$ .

Наиболее осторожные и радикальные специалисты-криптографы стали предлагать отказаться от уже ставшей слишком популярной криптосистемы Эль Гамала и ее вариаций. Но на смену пришли криптосистемы с той же задачей дискретного логарифма, но в другой оболочке – в других группах. Так, эллиптическая криптография базируется на абелевой группе точек эллиптической кривой относительно алгебраической операции сложения этих точек. Так как здесь операция аддитивная, вместо возведения в степень в уравнении (1) осуществляется многократное сложение точки с собою. Доказано, что криптографическая стойкость аддитивной задачи не уступает стойкости задачи дискретного логарифма из уравнения (1) [5].

XTR-криптосистема была впервые предложена в 2000 году на ежегодной международной научной конференции “Crypto-2000” авторами – Ленстрой А.К. и Верхейлом Э.Р. Название XTR явилось удачной аббревиатурой английского словосочетания “Efficient and Compact Subgroup Trace Representation”. XTR-криптография основывается на вычислениях в конечных полях, а точнее, на взаимоотношениях в башне расширений конечных полей  $GF(p) \subset GF(p^2) \subset GF(p^6)$  и вычислениях в полях  $GF(p^2)$  с большими простыми  $p$  [6].

Идея Шнорра К. П. применяется и в XTR-криптографии. Здесь  $q$  достаточно большой (максимально большой) простой делитель порядка

$p^2 - p + 1$  подгруппы мультипликативной группы  $GF(p^6)^*$ . Шифрование-дешифрование базируется здесь на вычислении следов из поля  $GF(p^6)$  в поле  $GF(p)$ , аналогичным задаче дискретного логарифма. Эти вычисления искусно реализуются на нижних этажах приведенной выше башни расширений полей Галуа, а вязкость этих вычислений и служит гарантом криптостойкости XTR-криптосистемы. В [7] строго доказано, что криптографическая стойкость XTR-криптосистемы не уступает стойкости криптосистем на эллиптических кривых. Здесь же приводится обобщение данной криптосистемы на алгебраические торы.

Теоретики разрабатывают и некоммутативный аналог задачи дискретного логарифмирования. Здесь предполагается, что информация будет представлена элементами некоторой некоммутативной группы  $G$ , а шифрование реализуется традиционно умножением на специальный элемент  $b \in G$ . При этом элемент  $b$  получается кратным сопряжением, то есть многократным преобразованием вида:

$$f(x) = axa^{-1} \quad (2)$$

некоторого открытого ключа  $x \in G$ .

Предлагаем в качестве группы  $G$  взять мультипликативную группу  $H^*$  тела или алгебры с делением классических вещественных кватернионов:  $H = \{h = x + yi + zj + tk \mid x, y, z, t \in R\}$  [8]. Здесь  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ ;  $ij = k = -ji$ ;  $jk = i = -kj$ ;  $ki = j = -ik$ . Для сопряжённого кватерниона  $\bar{h} = x - yi - zj - tk$  норма  $N(h) = h\bar{h} = x^2 + y^2 + z^2 + t^2 \in R^2$  – является положительным вещественным числом, если  $h \neq 0$ . Поэтому  $h^{-1} = \frac{\bar{h}}{N(h)}$  и преобразование

$$f(x) = axa^{-1} \text{ легко реализуется.}$$

Информационный вектор можно задавать в виде кватерниона из четырех целочисленных частей конечной конкретной разрядности:  $\bar{i} = a + bi + cj + dk$ . Для секретных ключей  $a \in H, n, l \in Z$  преобразуем открытый ключ  $x \in H^*$  по формуле (2)  $n$  –кратно в открытый ключ  $c \in H$ , который в свою очередь кратно  $l$  по формуле (2) преобразуем в сеансовый ключ  $b \in H$ . Шифрованное сообщение – кватернион  $d = b \cdot \bar{i}$ .

Приемной стороне все секретные ключи известны и расшифровать сообщение не составит труда. Конечно, возможны варианты с сеансовым ключом, подобные стандартной криптосистеме Эль Гамала. Хакеру для взлома данной криптосистемы придется найти  $n$  из соотношения:  $f^n(x) = c$ , что представляется сложной задачей.

#### Литература

1. Diffie W. and Hellman M.E. New Direction in Cryptography. // IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-22, Nev. 1976. – P. 644 – 654.

2. Сمارт Н. Криптография. – М.: Техносфера, 2005. – 528 с.

3. Липницкий В.А., Крупенкова Т.Г. Трехрядный вариант алгоритма “baby-step giant-step” в проблеме дискретного логарифмирования. // Материалы МНТС «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных». – Мн.: БГУИР, 2015. – С. 56 – 60.

4. Pohlig S.C. and Hellman M.E. An Improved Algorithm for Computing Logarithms Over  $GF(p)$  and its Cryptographic Significance. // IEEE Trans. Inf. Theory, 1978. – Vol. 1, no 24. – P. 106 – 110.

5. Болотов А.А., Гашков С.Б., Фролов А.Б. Элементарное введение в эллиптическую криптографию. Протоколы криптографии на эллиптических кривых. – М.: КомКнига, 2006. – 280 с.

6. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. В 2-х т. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 822 с.

7. Rubin Karl., Silverberg Alice. Algebraic tory in cryptography. // CRYPTO 2003. / Lecture Notes in Computer Science, vol. 2442. Springer-Verlag. 2003. – P. 1–11.

8. Пирс Р. Ассоциативные алгебры. – М.: Мир, 1986. – 524 с.

УДК 519.6

## НЕАДДИТИВНАЯ МЕРА

Романчак В.М.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**Введение.** В настоящее время величину определяют как “свойство материального объекта или явления, общее в качественном отношении для класса объектов или явлений, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них”. А под измерением понимают “процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине”. Эксперимент можно проводить с помощью объективных средств измерения или на основании субъективного мнения компетентного лица, которого мы будем называть экспертом. Поэтому будем считать, что измерение величины, в зависимости от метода получения измерительной информации, может быть объективным или субъективным. Например, можно измерять массу груза с помощью весов (объективное измерение, которое использует техническое средство), – а можно измерять ощущение веса, которое возникает у человека, когда он поднимает груз (субъективное измерение, использующее экспертные оценки).

Большинство объективных измерений использует единицу измерения и свойство аддитивности физических величин. В тех случаях, когда проводятся субъективные измерения, единица измерения отсутствует и измеряемая величина, как правило, не является аддитивной. Считаем, что измерить неаддитивную величину объектов можно в порядковой шкале, а значения величины будем находить косвенно. С этой целью аксиоматически введем понятие объектов  $A_i, i=1, 2, \dots, n$  величина которых изменяется равномерно. Номер объекта будем называть *рейтингом*. Введем в общем виде аксиоматическое определение рейтинга и выясним, каким образом рейтинг можно связать со значениями величины.

**Аксиоматическое определение рейтинга.** Чтобы формально ввести неаддитивную меру, введем область ее определения. Пусть задано конечное множество элементов  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ . Пусть  $\mathfrak{Z}$  — множество всех подмножеств  $\Omega$  (ал-

гебра). Для множества  $\mathfrak{Z}$  аксиоматически введем неаддитивную меру (рейтинг).

**Определение.** Неаддитивная мера (рейтинг) – это числовая функция  $r$ , определенная на множествах из алгебры  $\mathfrak{Z}$ , причем если  $A \subseteq B$ , то будет выполняться:

$$A_1. \text{ Если } A \neq B, \text{ то } r(B \setminus A) > 0,$$

$$A_2. r(B \setminus A) = r(B) - r(A).$$

Для множеств  $A_i \subseteq \mathfrak{Z}, i=1, 2, \dots, n$  можно ввести отношение частичного порядка, определив операцию включения  $\subseteq$ . В случае отношения частичного порядка среди множества  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  могут быть несравнимые элементы. Если во множестве  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  любые два элемента сравнимы, то такое множество называют *упорядоченным множеством*.

**Пример 1.** Пусть  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$  и  $\omega_1 \cdot \omega_2 = \emptyset$ , тогда  $\mathfrak{Z} = \{A_0, A_1, A_2, A_{12}\}$ , где  $A_0 = \emptyset, A_1 = \omega_1, A_2 = \omega_2, A_{12} = \omega_1 + \omega_2$ . Можно выделить два упорядоченных подмножества  $\mathfrak{Z}$ :  $\{A_0, A_1, A_{12}\}$  и  $\{A_0, A_2, A_{12}\}$ .

Пусть  $r(A_1 \setminus A_0) = r(A_{12} \setminus A_1)$ . Следовательно, выполняются равенства  $r(A_1) - r(A_0) = \lambda, r(A_{12}) - r(A_1) = \lambda$ , где  $\lambda$  – неизвестная положительная постоянная. Тогда  $r(A_1) = \lambda + r(\emptyset)$ , где  $\lambda = (r(\Omega) - r(\emptyset))/2$ . Причем  $r(\Omega), r(\emptyset)$  – любые числа, для которых выполняется неравенство  $r(\Omega) > r(\emptyset)$ . Если, например,  $r(\Omega) = 1$  и  $r(\emptyset) = 0$ , то получим вероятностную меру с вероятностями  $r(\omega_1) = 1/2$  и  $r(\omega_2) = r(A_{12} \setminus A_1) = r(\Omega) - r(\omega_1) = 1/2$ . Из примера следует, что аддитивная мера является частным случаем неаддитивной меры.

**Величина объекта.** Чтобы использовать определение неаддитивной меры для измерения величины объекта, определим величину объекта с позиций теории множеств. Определение приведем вначале для частного случая трех объектов. Пусть объекты  $A_1, A_2, A_3$  упорядочены по величине  $Q$  (объекты упорядочены с помощью некоторым отношением порядка  $\leq$ ) и выполняется  $A_1 \leq A_2 \leq A_3$ . Под величиной объектов  $A_1, A_2, A_3$  будем понимать множества  $\omega_1 = \{\{A_1\}\}, \omega_2 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}\}, \omega_3 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\},$

$\{A_2, A_3\}$ . Тогда для величины объектов определено отношение порядка на основании операции включения  $\omega_1 \subseteq \omega_2 \subseteq \omega_3$ . Определение величины объекта логически непротиворечиво. Так, если все три объекта совпадают,  $A_1=A_2=A_3$ , то величина объектов совпадает,  $\omega_1=\omega_2=\omega_3$ . Если совпадают два из трех объектов,  $A_1=A_2$ , то величина соответствующих объектов совпадает,  $\omega_1=\omega_2$  и аналогично, если  $A_2=A_3$ , то  $\omega_2=\omega_3$ . В общем случае для множества объектов  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , которые упорядочены по величине  $Q$  величину объекта  $A_k$  можно определить как множество  $\omega_k = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}, \{A_2, A_3\}, \dots, \{A_{k-1}, A_k\}\}$ .

Если считать, что для множества величин  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  определена неаддитивная мера (рейтинг), то каждому объекту  $A_k$  можно поставить в соответствие величину объекта  $\omega_k$  и рейтинг объекта  $r(\omega_k)$ . Следовательно, для объектов, величин объектов и рейтинг объектов определена композиция изоморфизмов  $A_k \rightarrow \omega_k \rightarrow r(\omega_k)$ , для которой выполняется  $A_i \leq A_j \Leftrightarrow \omega_i \subseteq \omega_j \Leftrightarrow r(\omega_i) \leq r(\omega_j)$ . Поэтому определим, что рейтинг объекта равен рейтингу соответствующей величины объекта  $r(A_i) = r(\omega_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ . Тогда для рейтинга объектов будет выполняться соотношение

$$r(\{A_i, A_j\}) = r(A_i) - r(A_j), \text{ если } A_i \geq A_j. \quad (7)$$

**Определение.** Если величина объектов  $A_1, A_2, \dots, A_n$  изменяется равномерно, то объекты упорядочены и для объектов определен рейтинг  $r$  таким образом, что  $r(A_2) - r(A_1) = r(A_3) - r(A_2) = \dots = r(A_n) - r(A_{n-1})$ ,  $r(A_2) - r(A_1) > 0$ .

**Пример 2.** Пусть события  $A_1, A_2, A_3$  упорядочены по вероятности и выполняется отношение порядка  $A_1 \leq A_2 \leq A_3$ . Определим величину вероятности событий  $A_1, A_2, A_3$  как  $\omega_1 = \{\{A_1\}\}$ ,  $\omega_2 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}\}$ ,  $\omega_3 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}, \{A_2, A_3\}\}$ . Множество величин  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$  упорядочено с помощью операции включения  $\subseteq$ . Пусть эксперт считает, что величина вероятности событий  $A_1, A_2, A_3$  изменяется равномерно, тогда для рейтинга вероятности  $r(A_2) - r(A_1) = \lambda$ ,  $r(A_3) - r(A_2) = \lambda$ ,  $\lambda > 0$ ,  $\lambda$  – неизвестная постоянная.

С помощью рейтинга можно сравнивать альтернативы в теории полезности. Если дано некоторое множество альтернатив  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , упорядоченных с помощью отношения предпочтения  $\preceq$ , то действительная функция  $u(A_i)$  является функцией полезности, если выполнено условие: для  $A_i \preceq A_j$  выполняется  $u(A_i) \leq u(A_j)$ .

**Пример 3.** Пусть на множестве альтернатив  $A_1, A_2, A_3$  определено отношение предпочтения  $A_1 \preceq A_2 \preceq A_3$ . Определим величину полезности альтернатив как множества  $\omega_1 = \{\{A_1\}\}$ ,  $\omega_2 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}\}$ ,  $\omega_3 = \{\{A_1\}, \{A_1, A_2\}, \{A_2, A_3\}\}$ , которые упорядочены с помощью операции включения  $\subseteq$ . Пусть эксперт считает, что величина полезности альтернатив  $A_1, A_2, A_3$  изменяется равномерно, тогда для рейтинга альтернатив выполняется  $r(A_2) - r(A_1) = \lambda$ ,  $r(A_3) - r(A_2) = \lambda$ ,  $\lambda$  – неизвестная постоянная,  $\lambda > 0$ .

Будем считать, что при любом измерении значения величины определены с точностью до изоморфизма, и рассматривать два способа определения значений величины  $Q$ :  $q(A) = r(A)$ , где  $q(A) \in R$  или  $q(A) = \exp(r(A))$ ,  $q(A) \in R^+$ .

**Определение.** Пусть определен рейтинг объектов  $A_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ . Значения величины – это числовая функция  $q_i = q(A_i)$ , определенная на множестве объектов  $A_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  для которой в зависимости от способа сравнения выполняется

$$q_i - q_j = r(A_i) - r(A_j) \quad (8)$$

$$\text{или} \quad \ln(q_i/q_j) = r(A_i) - r(A_j), \quad (9)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ , причем способ сравнения выбирается априори. Данное определение означает, что если найден рейтинг величины объекта, то можно произвольно выбрать способ сравнения и найти значения величины с помощью равенств (8) или (9). Данное определение означает, что если найден рейтинг величины объекта, то можно произвольно выбрать способ сравнения и найти значения величины с помощью равенств (8) или (9). Определение отражает особенность неаддитивного измерения величины.

УДК 004.05

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВСТРОЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ОАО «РУДЕНСК»

Спесивцева Ю.Б., Душина Т.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Стратегической целью ОАО «Руденск» является максимально возможное удовлетворение требований потребителей светотехнической продукции. Основным средством для достижения этой цели является система менеджмента качества, соответствующая ISO/TS 16949-2009, СТБ ISO/TS 16949.

В связи с появлением новой версии стандарта IATF 16949:2016 (2016 года) появилась необходимость в совершенствовании системы менеджмента качества в части выполнения требований стандарта

к оценке качества встраиваемого программного обеспечения (ПО) светотехнических изделий.

Оценив риски разработки встраиваемого программного обеспечения и проанализировав существующие методики для оценки его качества был выбран метод интегральной оценки качества программных средств (ГОСТ 28195), основанный на иерархической модели качества.

Оценка качества ПО проводится экспертной группой на этапе его применения (Таблица 1) и включает

выбор номенклатуры показателей, их оценку и сопоставление полученных значений показателей с базовыми значениями.

Таблица 1

| Фаза                         | Результат                                                                       |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Внедрение                    | Подтверждение стабильной эксплуатации. Предоставление набора услуг по внедрению |
| Эксплуатация                 | Предложения по улучшению. Сообщения о функциональных отклонениях                |
| Обслуживание (сопровождение) | Информация о сопровождении программы. Изменения в программном обеспечении       |

В состав экспертной группы входят руководитель и два эксперта.

Руководитель экспертной группы:

- получает план оценки качества ПО;
- перед началом проведения процедуры независимой оценки качества ПО доводит до сведения руководителя отдела АСУ организации порядок работы экспертной группы;

- организует и координирует работу экспертов при проведении процедуры независимой оценки качества ПО;

- выполняет работу эксперта в соответствии с планом;

- по окончании проведения процедуры независимой оценки качества ПО готовит заключение, составленное на основании обработки, анализа и интерпретации полученных результатов.

Программное обеспечение в соответствии с ГОСТ 28195 относится к типу 505 – прикладные программы для управления техническими устройствами и технологическими процессами. Для показателей качества на всех уровнях (факторы, критерии, метрики, оценочные элементы) принимается единая шкала оценки от 0 до 1.

Показатели качества на каждом вышестоящем уровне (кроме уровня оценочных элементов) определяются показателями качества нижестоящего уровня:

- результат оценки каждого фактора определяется результатами оценки соответствующих ему критериев;

- результат оценки метрик определяется результатом оценки определяющих ее оценочных элементов;

- результат оценки критерия определяется результатом оценки соответствующих ему метрик.

На каждом уровне (кроме уровня оценочных элементов) проводятся вычисления показателей качества ПО, т.е. определение количественных значений абсолютных показателей  $P_{ij}$ , ( $j$  – порядковый номер показателя данного уровня для  $i$ -го показателя вышестоящего уровня) и относительных показателей  $K_{ij}$ , являющихся функцией показателя  $P_{ij}$  и базового значения  $P_{ij}^{баз}$ .

Каждый показатель качества 2-го и 3-го уровней (критерий и метрика) характеризуется двумя числовыми параметрами – количественным значением и весовыми коэффициентами  $V_{ij}$ .

Сумма весовых коэффициентов показателей уровня  $l$ , относящихся к  $i$ -му показателю вышестоящего уровня  $l-1$ , есть величина постоянная. Сумма весовых коэффициентов  $V_{ij}$  принимается равной 1:  $\sum_{j=1}^n V_{ij} = const = 1$ , где  $n$  – число показателей уровня  $l$  относящихся к  $i$ -ому показателю вышестоящего уровня  $l-1$ .

Общая оценка качества ПО в целом формируется экспертами по набору полученных значений оценок факторов качества.

Для оценки качества ПО различного назначения методом экспертного опроса составляется таблица значений базовых показателей качества ПО.

Определение усредненной оценки  $m_{kq}$  оценочного элемента по нескольким его значениям  $m$ , проводится по формуле  $m_{kq} = \frac{\sum_{p=1}^t m_p}{t}$ , где  $t$  – число значений оценочного элемента;  $k$  – порядковый номер метрики;  $q$  – порядковый номер оценочного элемента. Итоговая оценка  $k$ -той метрики  $j$ -го критерия осуществляется по формуле:  $K_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{ij}^{баз}}$ .

Фактор качества  $K_i^\Phi$  определяется по формуле  $K_i^\Phi = \sum_{j=1}^N (K_{ij} \cdot V_{jk}^k)$ , где  $N$  – число критериев фактора, относящееся к  $i$ -му фактору.

Качество ПО определяется путем сравнения полученных расчетных значений показателей с соответствующими базовыми значениями показателей существующего аналога или расчетного ПО, принимаемого за эталонный образец. За базовые значения оценки принимали расчетные такого же функционального назначения, с такими же основными параметрами и применяемые в таких же условиях эксплуатации ПО, используемого в ОАО «КАМАЗ».

Критерии оценки качества, их метрики и оценочные элементы с оценками представляются в виде таблиц, занесенных в экспертную карту (фрагмент приведен в таблице 2).

Таблица 2

| Метрика                                            | Оценочный элемент                                              | Оценка |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Средства восстановления при ошибках на входе (0,4) | Полнота обработки ошибочных ситуаций                           | 0,8    |
|                                                    | Наличие тестов для проверки допустимых значений входных данных | 0,6    |
|                                                    | Наличие средств контроля корректности входных данных           | 0,9    |
|                                                    | Наличие обработки граничных результатов                        | 0,9    |

Оценка комплексных характеристик проводится группой экспертов коллегиально. Исходными данными для оценки являются результаты оценки единичных характеристик качества и соответствия требованиям. Оценка (число в интервале от 0,1 до 1) проставляется в правой колонке соответствующей строки формы, частично заполненной на предыдущем этапе.

В случае если при обсуждении эксперты смогут установить весовые коэффициенты, комплекс-

ные показатели получают расчетным методом весовой свертки. В противном случае, оценку (число в интервале от 0,1 до 1) выставляют в результате обсуждения.

Расчет интегрального показателя качества выполняется по формуле весовой свертки после уточнения группой экспертов весовых коэффициентов (значимости) комплексных характеристик качества.

Правила оценки соответствия нормативно-техническим документам по комплексным и интегральным показателям: если хотя бы одна единичная характеристика данного комплексного показателя имеет оценку «Не соответствует», такую же оценку получает комплексный показатель; если хотя бы один комплексный показатель имеет оценку «Не соответствует», такую же оценку получает интегральный показатель. Полученные оценки заносят в итоговую таблицу результатов оценки. По результатам выполнения данного и последующих этапов испытаний оформляется протокол с подписями всех участвовавших экспертов.

Все сотрудники должны осуществлять свою деятельность в соответствии с должностными инструкциями. Специалисты руководствуются в своей работе методикой оценки программного обеспечения, руководством по качеству, должностными инструкциями и требованиями, предъявляемыми к специалистам.

В результате проведенного анализа были получены следующие оценки факторов качества встроеного программного обеспечения:

- надежность -  $K_n^{\phi} = 0,79$ ;
- сопровождаемость  $K_c^{\phi} = 0,81$ ;
- удобство применения  $K_y^{\phi} = 0,55$ ;
- эффективность  $K_z^{\phi} = 0,9$ ;
- универсальность  $K_{ун}^{\phi} = 0,75$ ;
- корректность  $K_k^{\phi} = 0,84$ .

Все показатели принимают значения в пределах требуемой нормы в соответствии с ГОСТ 28195. Итоговая базовая оценка качества программного обеспечения 0,77, что является хорошим результатом.

УДК 621.375.826

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Мальцев В.В.<sup>2</sup>,  
Леонюк Н.И.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

Лазерное излучение с длиной волны 1.5-1.6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии благодаря целому ряду причин. Основным преимуществом указанного излучения является условная безопасность для органов зрения людей вследствие того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее роговицей и хрусталиком. К тому же, благодаря прозрачности атмосферы, а также высокому пропусканию излучения с длиной волны 1.5-1.6 мкм в условиях тумана, дыма и пара, лазерные источники указанного диапазона используются в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

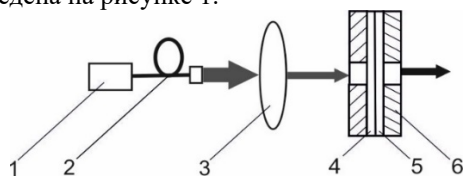
В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1.5-1.6 мкм. Однако благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. На сегодняшний день наибольшее практическое распространение среди эрбий-иттербиевых сред получили фосфатные стекла, которые характеризуются необходимыми спектроскопическими свойствами для получения эффективной лазерной генерации в области 1.5-1.6 мкм. Однако основным недостатком

использования фосфатных стекол с ионами эрбия и иттербия в качестве лазерных сред является их низкая теплопроводность (0.85 Вт/м×К) и, как следствие, низкий порог теплового разрушения в лазерах с высокой средней выходной мощностью.

Кристаллы гадолиний-алюминиевого бората, соактивированные ионами эрбия и иттербия, (Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) благодаря высокой теплопроводности и соответствию требованиям для получения эффективной генерации зарекомендовали себя ранее как перспективные активные среды для лазеров с высокой средней выходной мощностью, излучающих в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм. При их использовании получен непрерывный режим генерации с максимальной выходной мощностью до 1.7 Вт на длине волны 1550 нм и дифференциальной эффективностью 30%. В режиме пассивной модуляции добротности получены лазерные импульсы с энергией и частотой следования до 18 мкДж и 60 кГц, соответственно. Однако длительность лазерных импульсов в данном случае достигала 12 нс. В работе сообщается о реализации Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (GdAB) микрочип лазера с пассивной модуляцией добротности, который имеет полностью «монолитную» неразъединяемую конструкцию, что обеспечивает возможность трехкратного сокращения длительности лазерных импульсов до 4 нс за счет уменьшения геометрической длины резонатора.



Схема Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, приведена на рисунке 1.



1 – лазерный диод; 2 – оптоволокно; 3 – фокусирующая линза; 4 – насыщающийся поглотитель; 5 – активный элемент; 6 – медный теплоотвод

Рисунок 1 – Схема Er,Yb:GdAB микрочип лазера

В качестве источника накачки использовался лазерный диод 1 с волоконным выводом излучения 2 (диаметр волокна 105 мкм, числовая апертура 0.22), излучающий на длине волны около 980 нм с максимальной выходной мощностью до 15 Вт и параметром распространения лазерного пучка  $M^2$  равным 22. Для уменьшения термической нагрузки на активный элемент лазерный диод работал в импульсно-периодическом режиме со скважностью 2%. Излучение накачки фокусировалось внутри активного элемента в пятно диаметром 120 мкм при помощи линзы 3. «Чип» состоял из насыщающегося поглотителя кристалла магний-алюминиевой шпинели с ионами кобальта (Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 4 с начальным пропусканием 98.2% и нанесенным на входную грань покрытием HR@1550 нм + HT@980 нм и кристалла Er(1.8 ат.%),Yb(15 ат.%):GdAB 5 с нанесенным на выходную грань покрытием выходного зеркала с пропусканием 6% на длине волны генерации 1550 нм, соединенными между собой методом оптического контакта. Таким образом, геометрическая длина резонатора не превышала 2 мм, а лазер имел неразъединяемую конструкцию.

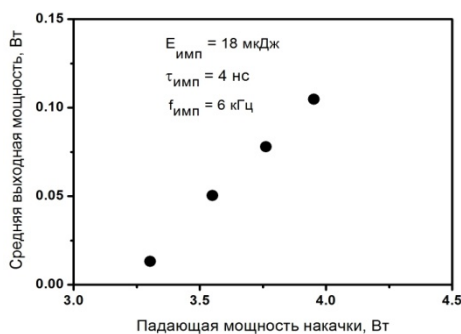


Рисунок 2 – Зависимость средней выходной мощности лазера от падающей мощности накачки

Зависимость средней выходной мощности лазера от падающей мощности накачки представлена на рисунке 2. Максимальная средняя выходная мощность лазера составила 108 мВт на длине волны генерации 1550 нм при падающей мощности накачки 4 Вт. Энергия лазерных импульсов составила 18 мкДж, длительность импульсов не превышала 4 нс. Максимальная частота следования импульсов не достигала 6 кГц при падающей мощности накачки 4 Вт и была ограничена нарушением оптического

контакта между насыщающимся поглотителем и кристаллом при падающей мощности накачки более 4 Вт. Расходимость лазерного излучения была дифракционно-ограниченной, параметр распространения лазерного пучка  $M^2$  не превышал 1.2.

Оциллограммы одиночного импульса и цуга импульсов, записанные при падающей мощности накачки около 4 Вт, представлены на рисунках 3, 4.

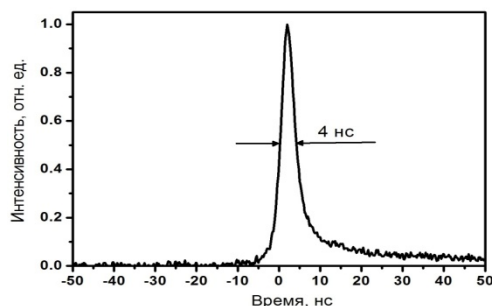


Рисунок 3 – Оциллограмма одиночного импульса длительностью 4 нс

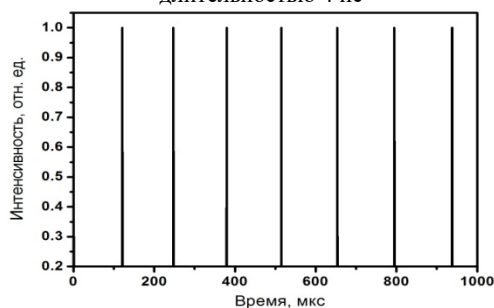


Рисунок 4 – Оциллограмма цуга импульсов с частотой следования 6 кГц

В таблице приведены выходные характеристики Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности.

Таблица – Выходные характеристики Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности

| 2ω,<br>мкм | E,<br>мкДж | f,<br>кГц | t,<br>нс | P <sub>ср</sub> ,<br>мВт | λ,<br>нм |
|------------|------------|-----------|----------|--------------------------|----------|
| 120        | 18         | 6         | 4        | 108                      | 1550     |

### Литература

1. G. Karlsson, F. Laurell, J. Tellefsen, B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, and S. Sverchkov, "Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping," Appl. Phys. B. 75, 41 (2002).
2. R. Fluck, R. Haring, R. Pascotta, E. Gini, H. Meichior, U. Keller, Appl. Phys. Lett., 1998, 72, 3273.
3. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, and N.V. Kuleshov, "High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser," Optics Letters 38, 2446 (2013).
4. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov, "Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser," Opt. Lett. 41, 918–921 (2016).

Научное издание

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2018**

Материалы  
11-й Международной научно-технической конференции

14–16 ноября 2018 года  
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *А. К. Тявловский*  
Оформление и компьютерная верстка *К. В. Пантелеева*

Подписано в печать 10.11.2018. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 58,94. Уч.-изд. л. 23,05. Тираж 150. Заказ 925.  
Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.