



# **СБОРНИК**

научно-практической конференции  
в рамках Форума проектов программ  
Союзного государства – VI Форума  
вузов инженерно-технологического профиля

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА:  
ПАРТНЕРСТВО И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ  
СТРАН И ТЕХНОЛОГИЙ**

24-28 ОКТЯБРЯ 2017

ПОСТОЯННЫЙ КОМИТЕТ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белорусский национальный технический университет

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПАРТНЕРСТВО И УСТОЙЧИВОЕ  
РАЗВИТИЕ СТРАН И ТЕХНОЛОГИЙ**

Сборник научно-практической конференции в рамках  
Форума проектов программ Союзного государства –  
VI Форума вузов инженерно-технологического профиля

24–28 октября 2017 г.

Минск  
БНТУ  
2018

УДК 620.9 (06)  
ББК 31я43  
Г54

В сборник включены материалы научно-практической конференции «Глобальная энергетика: партнерство и устойчивое развитие стран и технологий» в рамках Форума проектов программ Союзного государства – VI Форума вузов инженерно-технологического профиля.

ISBN 978-985-583-180-9

© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1

#### ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

<i>Н.Б. Карницкий, С.А. Качан, А.Г. Герасимова, А.Л. Буров</i> ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС НА КАФЕДРЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ БНТУ .....	9
<i>Е.Н. Живицкая, С.М. Сацук</i> РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (STAR-NET) .....	12
<i>В.Н. Романюк, А.А. Бобич</i> КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ БЕЛОРУССКОЙ АЭС И ПОДГОТОВКА КАДРОВ .....	16
<i>А.Л. Буров, А.А. Павловская</i> ТРЕНАЖЕРНАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ В БЕЛОРУССКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ДЛЯ ПЕРВОЙ БЕЛОРУССКОЙ АЭС .....	19
<i>Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, А.Н. Кухоренко</i> КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС .....	22

### СЕКЦИЯ 2

#### ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, СИСТЕМНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

<i>С.В. Василевич, М.В. Малько, А.Н. Асадчий, В.Н. Богач, Д.В. Дегтерев</i> ПОЛУЧЕНИЕ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА ПУТЁМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ .....	26
<i>К.В. Добрего, Г.Б. Ковтун, А.Д. Дубатовка</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР–НАКОПИТЕЛЬ–ПОТРЕБИТЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВИЭ .....	29
<i>М.А. Комаревцев, А.Н. Попов, Д.А. Ярков</i> СИСТЕМА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ .....	33

<i>Ф. Свитала</i> ОРИГИНАЛЬНАЯ ТУРБИНА ДЛЯ МАЛЫХ НАПОРОВ И МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	35
<i>В.Г. Григорьев, К.Ю. Шалабодова, Д.Б. Муслина</i> РОЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОБАЛАНСЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	42
<i>Ф. Свитала</i> СТОЛЕТНЯЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ЛЕСНАЯ – ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ.....	44
<i>Г.А. Стройков</i> О РАСТУЩЕЙ РОЛИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ОБЩЕМИРОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РФ .....	52
<i>А.И. Кангаши, Н.Р. Наумов, П.А. Марьяндышев</i> ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТРОВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПОСЕЛКА СОЛОВЕЦКИЙ .....	56
<i>А.М. Сафина</i> ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ АВТОДОРОГ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА.....	61
<i>В.Л. Червинский, А.М. Шимель</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЕТРОГЕНЕРАТОРОМ.....	64
<i>М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова</i> ПОИСК СПОСОБОВ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ ТЭС НА ПРИМЕРЕ СЛАНЦЕЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ .....	68
<i>В.Э. Блажук, В.Н. Ануфриев, О.И. Родькин</i> ОБРАБОТКА ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД НА СООРУЖЕНИЯХ С НИЗКИМИ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЗАТРАТАМИ .....	71
<i>Д.В. Николаева, А.А. Наумов</i> РАЙОНИРОВАНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ РОССИИ ПО ЗАТРАТАМ НА РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В РУДНИКЕ .....	74

<i>А.С. Панасюгин, А.И. Теран, В.Н. Ануфриев, С.В. Григорьев, Т.В. Силина</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО И КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА НЕФТЯНЫХ ФРАКЦИЙ С ТЕМПЕРАТУРОЙ КИПЕНИЯ 40-140°С В ВОДЕ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОЙ МИКРОЭКСТРАКЦИИ (SPME) .....	76
---	----

### **СЕКЦИЯ 3**

#### **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<i>М.И. Фурсанов, А.А. Золотой, В.В. Макаревич</i> СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ SMART GRID .....	81
--	----

<i>М.А. Короткевич</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ .....	84
--	----

<i>Е.В. Калентионок</i> АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЕКЦИОНИРОВАНИЕ И ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ УЧАСТКОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ .....	85
--	----

<i>В.Б. Козловская, В.Н. Калечиц</i> ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ .....	88
--	----

<i>В.А. Анищенко, Т.В. Писарук</i> СЕМАНТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ .....	91
---	----

<i>И.В. Новаш, Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев</i> КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ .....	93
--	----

<i>Л.К. Галимова</i> «УМНЫЕ» ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ .....	97
---	----

### **СЕКЦИЯ 4**

#### **ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЭС И АЭС**

<i>С.И. Страчинский, В.В. Янчук</i> ПРИМЕНЕНИЕ АБСОРБЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СИСТЕМЕ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ .....	100
---	-----

<i>М.И. Валендюк, К.В. Прокопенко, И.Н. Прокопеня</i> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ Веществ на выход биогаза.....	104
<i>О.В. Василевский, С.Ю. Гончаров, И.Н. Прокопеня</i> ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОГАЗА .....	106
<i>Д.Б. Муслина, Т.А. Петровская</i> ПЛАНИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ENERGYPLAN .....	108
<i>В.Н. Романюк, А.А. Бобич</i> КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ БЕЛАЭС .....	111
<i>В.А. Седнин, Т.В. Бубырь</i> РЕГЕНЕРАТИВНО-УТИЛИЗАЦИОННОЕ ТЕПЛОИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НЕПРОХОДНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛОТРАСС.....	116
<i>В.А. Седнин, А.А. Абрамовский</i> АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ .....	120
<i>А.И. Минибаев, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, А.Р. Мамлеева</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ ПО ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	123
<i>М.А. Коробицына</i> ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ .....	128
<i>М.Л. Рудаков, Л.В. Степанова</i> ТЕПЛООБМЕН РАБОТНИКА В СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЕ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНОГО МИКРОКЛИМАТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ.....	131
<i>И.В. Качанов, В.В. Власов, М.В. Кудин, С.А. Ленкевич</i> РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СКОРОСТНОГО ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЕВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	135

*И.В. Качанов, А.Н. Жук, А.В. Филипчик, В.А. Ключников*  
ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ СТАЛЬНЫХ  
ЛИСТОВ ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ ..... 138

*С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.В. Рязанов, А.Н. Пронин,  
Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов*  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
СМЕШЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЯДЕРНЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ..... 142

*С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев,  
А.Е. Хробостов*  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ  
ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ  
В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК  
С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ..... 145

## **СЕКЦИЯ 5 ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ**

*В.Б. Таранчук, Д.В. Баровик*  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ  
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЯН НА ПУТИ ОГНЯ ..... 149

*Д.А. Осминко, В.В. Максаров*  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВЗРЫВООПАСНЫМИ СРЕДСТВАМИ  
В АТОМНОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ ..... 152

*В.Б. Таранчук*  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ТЕСТИРОВЩИКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ..... 156

*В.В. Сорокин*  
РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО  
РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА ..... 159

*Г.Т. Кулаков, Н.Б. Карницкий, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко,  
К.И. Артёменко*  
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТИПОВОЙ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ  
ЭНЕРГОБЛОКА ..... 161

<i>Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, К.И. Артёменко</i> ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР С ЗАДЕРЖКОЙ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ .....	164
<i>А.А. Колотов, А.Н. Терентьев</i> ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИИ .....	170
<i>В.З. Салахутдинова</i> АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ .....	172

## **СЕКЦИЯ 1**

### **ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

УДК 621.311.25:621.039.524.4

#### **ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС НА КАФЕДРЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ БНТУ**

*Н.Б. Карницкий, С.А. Качан, А.Г. Герасимова, А.Л. Буров*

Подготовка высококвалифицированных специалистов является одним из важнейших условий успешной реализации проекта Белорусской АЭС. Решение этого вопроса предусмотрено Государственной программой (далее – Госпрограмма) подготовки кадров для ядерной энергетики РБ на 2008-2020 годы, утвержденной постановлением Совета Министров РБ №1329 от 10 сентября 2008 года. Постановлением Совета Министров от 26 марта 2016 года № 250 утверждена Государственная программа «Образование и молодежная политика» на 2016-2020 годы, подпрограмма 10 «Подготовка кадров для ядерной энергетики».

Основные задачи Госпрограммы: организация системы комплексной подготовки специалистов, получение знаний и навыков, необходимых для строительства и безопасной эксплуатации атомной электростанции, а также гарантия ядерной и радиационной безопасности, безопасности персонала АЭС, населения и окружающей среды.

В соответствии с Указом Президента РБ от 12 ноября 2007 года № 565 «О некоторых мерах по строительству атомной станции» и Госпрограммой, на кафедре «Тепловые электрические станции» (ТЭС) энергетического факультета Белорусского национального технического университета (БНТУ) в 2008 году открыта новая специальность 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций», на которую в течение уже десяти лет осуществляется прием абитуриентов.

Выпускники специальности 1-43 01 08 готовятся для профессиональной деятельности не только в сфере производства в области проектирования и эксплуатации АЭС, но также в сфере образования и науки. В настоящее время более 50 выпускников прибыли на работу в РУП «Белорусская АЭС» и Департамент по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор); два выпускника работают на кафедре ТЭС, обеспечивая учебный процесс по специальным дисциплинам в лабораториях, ассистируя и самостоятельно проводя учебные занятия. Выпускники специальности 1-43 01 08 могут применить свои знания, проводя научные исследования в области проектирования и эксплуатации паротурбинных установок АЭС, модернизации оборудования, оптимизации технологических схем и природоохранных мероприятий и взаимодействия АЭС с окружающей средой.

Подготовка специалистов ведется в соответствии с введенными в действие нормативными документами. В процессе обучения студенты

получают глубокую теоретическую подготовку по фундаментальным дисциплинам и приобретают необходимые знания по всей технологической схеме производства электроэнергии на АЭС. Студенты осваивают базовые знания по ядерной и нейтронной физике, конструкции и работе ядерных энергетических реакторов, парогенераторов, паротурбинного и вспомогательного оборудования АЭС, наладке и диагностике оборудования, по автоматизированным системам управления, радиационной безопасности и обращению с радиоактивными отходами АЭС.

Учебно-методическая база кафедры постоянно пополняется современной учебной, справочной и научной литературой.

Преподавателями кафедры подготовлены и изданы в издательствах «Вышэйшая школа», «Техническая литература» БНТУ и Белорусского государственного технологического университета ряд учебников и учебных пособий в рамках изучения дисциплин специальности 1-43 01 08.

С целью повышения уровня подготовки инженеров для чтения специальных дисциплин приглашаются специалисты отечественных и иностранных вузов и энергетических предприятий, среди которых: Институт атомной энергетики (г. Обнинск, Россия), Ульяновский государственный университет (г. Ульяновск, Россия), Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности (г. Севастополь, Украина – Россия), Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Б, Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова и др.

Кафедра ТЭС имеет хорошо оснащенную лабораторную базу. Благодаря финансированию, предусмотренному Госпрограммой, ее дополнили современные лабораторные стенды и установки: воздушные турбины оснащены современной системой вибрационного контроля; внедрены стенды по балансировке вращающихся механизмов и исследованию гидравлических характеристик насосного оборудования, центробежных и осевых вентиляторов, вентиляторной градирни, а также современные средства теплотехнических измерений, которые используются на действующих электростанциях, приборы для проведения химического анализа и подготовки теплоносителя, стенды для исследования термодинамических процессов и процессов теплопередачи. На персональных компьютерах установлена компьютерная обучающая система (КОС) по основам Политики, Руководства и Технологии АЭС (проект МАГАТЭ); внедрен аналитический тренажер турбинного отделения АЭС с ВВЭР-1000 (проект МАГАТЭ), который обеспечивает выработку общих навыков по управлению турбогенератором АЭС с реактором ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации, режимах с нарушениями нормальной эксплуатации и аварийных режимах.

Для закрепления теоретических знаний студенты младших курсов специальности 1-43 01 08 проходят практику на традиционных тепловых электростанциях Беларуси. На старших курсах производственная и пред-

дипломная практика проводится за рубежом: на АЭС, в учебно-тренировочных центрах (подразделениях) АЭС, в учебных вузах.

Основные базы практики – филиалы АО «Концерн Росэнергоатом» (Россия): Нововоронежская АЭС (г. Нововоронеж); Калининская АЭС (г. Удомля), Ростовская АЭС, (г. Волгодонск), Смоленская АЭС (г. Десногорск); Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности (г. Севастополь, Украина – Россия); Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия) и др.

В 2012 году студенты проходили производственную практику по программе Германской службы академических обменов (ДААД) в Германии, где ознакомились с устройством и эксплуатацией современных объектов энергетики, которые не имеет аналогов в Беларуси. Это действующие и находящиеся в стадии демонтажа АЭС; объекты захоронения ядерных отходов; исследовательская шахта, где на месте геологического соляного образования на глубине около 900 м велись исследования о его пригодности к организации постоянного подземного захоронения радиоактивных отходов.

В 2016 году производственная практика проходила в «Институте управления ядерными знаниями» – НКМІ (г. Вена, Австрия), а в 2017 году – на АЭС «Моховце» (г. Левице, Словакия).

Ежегодно несколько студентов принимают активное участие в школе-семинаре «Ядерная энергетика и нераспространение: ответ на вызовы современности», которая ежегодно проходит в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (г. Москва).

В рамках выполнения Госпрограммы преподаватели кафедры посетили ведущие вузы России и Украины для ознакомления с учебными планами и программами, материально-технической базой и особенностями подготовки студентов-атомщиков; прошли курсы повышения квалификации и стажировки в Институте атомной энергетики (г. Обнинск, Россия), в Национальном ядерном университете «МИФИ», в учебном центре СЕТИС Международной Академии атомной энергетики (Chalon-sur-Saône, Франция), НКМІ (г. Вена, Австрия); неоднократно посещали строительную площадку Белорусской АЭС, а также принимают участие в различных семинарах, проводимых МАГАТЭ.

Отметим также, что в РУП «Белорусская АЭС» работает более сотни выпускников специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», получившие опыт работы на традиционных для Беларуси ТЭС и прошедшие специальную подготовку на АЭС, как на рабочих должностях, так и на специализированных курсах учебно-тренировочных центров и подразделений АЭС России, Литвы и дальнего зарубежья.

**Вывод.** Подразделение ЭФ БНТУ – кафедра «Тепловые электрические станции» предоставляет широкие возможности получения современных знаний в области ядерной энергетики, обеспечивает высокое качество теоретических и практических занятий, в том числе производственной

практики. Полученный опыт и знания инженеры-энергетики, подготовленные по специальности «Паротурбинные установки АЭС», смогут успешно использовать при работе на первой Белорусской АЭС.

УДК 621

## **РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (STAR-NET)**

*Е.Н. Живицкая, С.М. Сацук*

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники*

В соответствии с рекомендациями Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) система подготовки кадров для ядерной энергетики должна базироваться на принципах применения системного подхода к подготовке персонала, основанного на соответствующих документах МАГАТЭ, международном опыте, а также на соответствии системы подготовки персонала требованиям законодательства в области ядерной и радиационной безопасности.

В этой связи ряд стран, членов МАГАТЭ, как с развитой ядерной инфраструктурой, так и с развивающейся, выразили желание о сотрудничестве для обмена опытом в области ядерной энергетики и обеспечения стабильного развития ядерного сектора.

В части образования в области ядерных технологий наблюдаются заметные различия в уровне подготовки и использования ресурсов в зависимости от экономического развития страны и применения ядерных технологий: нехватка кадров в одних странах и эффективные образовательные системы для подготовки высококвалифицированных кадров в других. Это обозначило необходимость сотрудничества между учебными заведениями, научными центрами и организациями стран региона Восточной Европы и Средней Азии. Эти страны обозначили потребность в обеспечении квалифицированными кадрами для эффективной работы ядерного сектора, а также для будущего расширения и развития науки.

С 22 по 24 апреля 2015 года в БГУИР проходило консультативное совещание в рамках создания Региональной сети ядерного образования и подготовки персонала в области ядерной энергетики. В ходе совещания было принято решение о необходимости создания региональной сети, выработан план мероприятий по созданию сети в составе стран региона Восточной Европы и Средней Азии и взаимодействию с МАГАТЭ.

17 сентября 2015 года в МАГАТЭ состоялось подписание Соглашения о создании сети ядерного образования STAR-NET. Соглашение подписали представители 12 университетов из 6 стран: Армении, Азербайджана, Республики Беларусь, Казахстана, России и Украины. Это новая региональная сеть ядерного образования (аналог ANEN, LANET, AFRA-NEST, ENEN и др.), охватывающая регион Восточной Европы и Средней Азии. Сеть со-

здана под эгидой МАГАТЭ. Инициаторами создания сети выступили Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева.

В декабре 2015 года Региональная сеть STAR-NET была зарегистрирована как ассоциация в соответствии с Австрийским законом об ассоциациях с международным участием.

Основной целью региональной сети STAR-NET является улучшение качества подготовки кадров для ядерной энергетики стран-участников сети через сотрудничество в области ядерного образования и проведение совместных научных исследований.

Направления деятельности:

- образовательная деятельность и учебно-методическая работа;
- профессиональная подготовка и взаимодействие с атомной промышленностью;
- исследовательская и научно-техническая деятельность;
- управление ядерными знаниями;
- информационные системы поддержки деятельности сети.

Органами управления региональной сети являются: Генеральная Ассамблея, Президиум, Президент и Ученый секретарь, Исполнительный Директор. В ходе учредительной Генеральной Ассамблеи членов сети были выбраны управляющие органы STAR-NET: Президиум, Президент, Ученый секретарь, Исполнительный Директор. Определены 5 рабочих групп по направлениям деятельности сети. Президентом выбран ректор НИЯУ «МИФИ» Стриханов М.Н. Ученым секретарем – проректор по учебной работе БГУИР Живицкая Е.Н. О своем интересе и возможном присоединении к этой сети заявили ведущие университеты Болгарии, Словакии, Венгрии.

В качестве исполнителей в сети STAR-NET выступают рабочие группы, которые представляют участников STAR-NET:

*Группа 1.* Вебсайт, включая образовательный портал:

- создание веб-страницы, образовательного портала, базы данных, (разработка ТЗ: дизайн, функционал, администрирование);
- интеграция системы дистанционного обучения CLP4NET в образовательный портал;
- координация создания образовательного портала и его обслуживания;
- актуализация базы данных для хранения информации.

*Группа 2.* Программы, модули и дисциплины обучения:

- инвентаризация и определение программ обучения, дисциплин для подготовки специалистов в области ядерных технологий, доступных в регионе;
- определение возможностей дистанционного обучения и/или курсов электронного обучения;
- актуализация и передача соответствующей информации для публикации на веб-сайте.

*Группа 3. Учебно-методические материалы:*

- сбор, комплектация и обмен современными учебно-методическими материалами;
- продвижение разработки новых и инновационных учебно-методических материалов;
- разработка учебных материалов и модулей для систем дистанционного обучения;
- разработка методического обеспечения и учебных материалов для повышения квалификации персонала ядерной сферы;
- систематизация категорий ядерных знаний, эксплуатация ядерных энергетических установок;
- передача материалов для публикации на веб-сайте;
- формирования дисциплины по управлению ядерными знаниями.

*Группа 4. Педагогическая и технологическая поддержка:*

- подготовка документов, в которых отражено использование педагогических и технологических принципов, практик, методов и ресурсов;
- разработка для портала STAR-NET виртуального содружества по оказанию педагогической и технологической поддержки;
- организация традиционных и дистанционных семинаров.

*Группа 5. Исследовательская и научно-техническая деятельность:*

- организация научных исследований и распространения инновационных знаний в сфере ядерных технологий;
- совместное пользование уникальным научно-исследовательским оборудованием (исследовательские ядерные реакторы и др.);
- создание базы данных реферативной информации в исследовательской и научно-технической деятельности с учётом интеллектуальной собственности и авторского права;
- определение возможностей обмена научными сотрудниками, аспирантами, докторантами;
- развитие методов оценки и совершенствования показателей качества работы системы управления ядерными знаниями на АЭС.

*Группа 6. Организация сотрудничества:*

- определение возможностей для обмена студентов и преподавателей;
- определение различных форм финансовой и юридической поддержки для организации обмена студентами и преподавателями;
- определение возможностей комплектации и форм передачи оборудования для подготовки специалистов в области ядерных технологий;
- актуализация и передача соответствующей информации для публикации на веб-сайте.

В каждой рабочей группе определен университет-координатор и руководитель, который несет ответственность за организацию деятельности рабочей группы по выполнению запланированных на текущий год мероприятий и представление годового отчета на Генеральной Ассамблее STAR-NET.

В апреле 2016 года в БГУИР состоялось рабочее совещание в рамках Региональной сети по подготовке кадров для ядерной энергетики STAR-NET. В ходе совещания подготовлен план работы тематических групп на 2016 год и обсуждены текущие вопросы сотрудничества в области ядерного образования.

В июне 2016 года на основе STAR-NET была организована производственная практика студентов БГУИР и БНТУ на базе штаб-квартиры МАГАТЭ в г. Вена (Австрия). В качестве организаторов практики выступили Региональная сеть STAR-NET и Институт управления ядерными знаниями г. Вена (Австрия). В программу практики были включены лекционные и практические занятия, технические визиты, круглые столы, индивидуальная работа студентов. Преподавательский состав состоял из 19 человек, представляющих разные страны и континенты. В качестве технических визитов организовано посещение центра МАГАТЭ по чрезвычайным ситуациям и исследовательского реактора TU Wien/Atominstiut Stadionallee 2 A-1020. Индивидуальная работа студентов проводилась дистанционно с использованием платформы МАГАТЭ «CLP4NET».

В октябре 2016 года на базе НИЯУ «МИФИ» состоялось совместное заседание участников Генеральной Ассамблеи и Президиума. Рассмотрены общие вопросы сотрудничества, подписан протокол по итогам совместного заседания участников Генеральной Ассамблеи и Президиума STAR-NET. Были обсуждены вопросы, связанные с совместной работой по направлениям тематических групп (итоги деятельности, предложения университетов-координаторов и планы работ на 2017 год).

В апреле 2017 года на базе Белорусского национального технического университета состоялось рабочее совещание STAR-NET. На этом совещании были обсуждены вопросы, касающиеся работ по направлениям «Программы, модули и дисциплины обучения», «Исследовательская и научно-техническая деятельность» а также заслушан отчет об участии представителей сети STAR-NET в совещании региональных сетей ядерного образования в г. Манчестере.

Под эгидой STAR-NET и при непосредственном участии НИЯУ «МИФИ», БГУИР и БНТУ в 2015 и 2016 годах была организована и проведена Международная студенческая олимпиада по ядерной физике и ядерным технологиям.

Региональная сеть образования и подготовки кадров в области ядерных технологий STAR-NET является связующим звеном для реализации научно-образовательных проектов в области подготовки кадров для ядерной энергетики.

## **КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ БЕЛОРУССКОЙ АЭС И ПОДГОТОВКА КАДРОВ**

*В.Н. Романюк, А.А. Бобич*

*Белорусский национальный технический университет*

В условиях избытка генерирующих мощностей и значительного изменения их структуры развитие энергосистемы должно связываться с мероприятиями по обеспечению условий стабильности и повышения эффективности ее работы. Требуется изменения в работе всех энергоисточников, которые при сохранении или повышении надежности энергосистемы должны обеспечивать дальнейший рост системного энергосберегающего эффекта. С усложнением структуры и режимов функционирования системы все более актуальным становится проблемы выбора вариантов планируемых к внедрению технических решений. В этих условиях для оценки эффективности энергосистемы, кроме традиционных и абсолютно необходимых показателей надежности и экономичности, следует рекомендовать термодинамические критерии [1].

С вводом Белорусской АЭС прогнозируются избытки мощности в период ночных провалов в отопительный и межотопительный периоды возникает проблема регулирования графиков нагрузки энергосистемы, поскольку из генерации вытесняются традиционные регуляторы мощности, и решение комплекса задач, сопутствующих проблеме, невозможно без участия ТЭЦ.

Для ликвидации ожидаемых избытков мощности предусматривается использование тепловых нагрузок систем теплоснабжения, часть которых планируется передавать в часы провалов электропотребления от традиционных теплогенерирующих источников к взаимосвязанным комплексам в составе «электрокотел – тепловой аккумулятор», обеспечивающих увеличение электрической нагрузки энергосистемы Беларуси [2]. Указанные комплексы безусловно необходимы в условиях, которые будут иметь место в энергосистеме страны, поскольку при должной их суммарной мощности в состоянии обеспечить необходимую динамику процесса регулирования выполнения соотношения «генерация – потребление электроэнергии». Вместе с тем, такое искусственное увеличение электрической нагрузки не решает всех задач, традиционно имеющих место в энергосистеме, например, надежность тепло- и электрообеспечения потребителей, снижение удельного расхода топлива на ТЭЦ, а также проблем, связанных с необходимостью разгрузки отборов паровых турбин до технического минимума. Также следует отметить, что результаты количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси после ввода в строй АЭС и электрокотлов и сравнение их с данными по существующему положению в энергосистеме указывают на сниже-

ние ее термодинамической эффективности от 2,3% в отопительный период до 3,2% в межотопительный период [3], рис. 1.

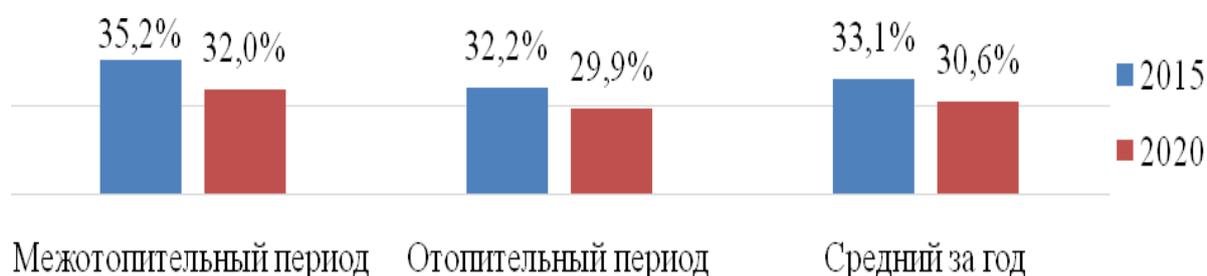


Рисунок 1 – Сравнение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в 2015 и в 2020 году при работе Белорусской АЭС и электрокотлов

В свете изложенного очевидна необходимость придания не свойственных ТЭЦ функций ни сегодня, ни в недавнем прошлом, и которые желательно будет выполнять без ухудшения одного из основных показателей работы ТЭЦ – удельного расхода топлива на отпускаемые потоки электроэнергии и тепловой энергии. Такими новыми, востребованными со стороны энергосистемы к ТЭЦ страны функциями, на наш взгляд, будут две:

1. способность резервировать и изменять генерацию электроэнергии при сохранении отпуска тепловой энергии без перерасхода природного газа и без потери моторесурса основного оборудования;

2. способность значительно изменять (снижать) удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении.

При указанных функциональных требованиях необходимо обеспечить высокие технико-экономические показатели ТЭЦ:

– снизить УРТ до уровня лучших теплотехнологических когенерационных комплексов промышленных предприятий, т. е. величины УРТ на уровне не более 150 г/(кВт·ч) для обеспечения конкурентоспособности электроэнергии, выработанной на ТЭЦ;

– обеспечить надежность снабжения тепловых потребителей в соответствии с их категорией и с сохранением комбинированной выработки отпускаемых тепловой и электрической энергии;

– минимизировать рассеяние энергии за счет утилизации низкотемпературных тепловых потоков и вытеснением процессов дросселирования.

Для достижения указанных целей в работе [4] предложены перспективные технические мероприятия, позволяющие повысить эффективность энергосистемы путем внедрения на ТЭЦ абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов (АБТН), тепловых аккумуляторов (ТА) и интеграции в состав ТЭЦ высоких начальных параметров ГТУ по сбросной схеме с основным оборудованием. Единовременное внедрение перечисленных мероприятий в полном объеме, при всей заманчивости такой реализации, по различным причинам оказывается невозможным. В этой связи очевидна необходимость оценки вклада в ожидаемый эффект (возможно-

сти резервирования, снижения расхода природного газа и пр.) того или иного из перечисленных мероприятий, а также определения количественной оценки эффективности энергосистемы с многоукладной структурой энергоисточников: КЭС, ТЭЦ, котельные на органическом топливе, АЭС на ядерном топливе, электрокотлы на ТЭЦ, электрокотельные, ГЭС, ветроэлектростанции. В [1, 5] показана целесообразность применения для принятия решения по выбору варианта развития системы термодинамического метода, и, в частности, на базе расчета термодинамического КПД для получения количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси на различных стадиях ее развития: от текущей ситуации, до интеграции в ее состав АЭС и дальнейшего совершенствования с применением комплекса технических решений.

Реализация комплекса мероприятий, рассмотренных выше, обеспечивает дополнительно после ввода в строй АЭС уменьшение потребления природного газа до 0,74 млн т у.т. в год, что, в конечном итоге, увеличивает термодинамическую эффективность энергосистемы до 32,2%, однако требует специалистов соответствующей квалификации, которых следует адаптировать и подготавливать к складывающимся в энергосистеме условиям.

**Выводы:** Термодинамическая эффективность энергосистемы может быть дополнительным объективным и стабильным показателем при принятии соответствующих решений внедрения энергосберегающих мероприятий.

Ввод АЭС улучшает структуру генерирующих мощностей энергосистемы, снижает потребление природного газа до 4,2 млн т у.т., однако при этом, что ожидаемо, ухудшается термодинамическая эффективность энергосистемы с 33,1 до 30,6%.

Для реализации рассмотренного комплекса технических решений, который позволит повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ, следует рекомендовать существующим специалистам ТЭЦ пройти переподготовку для возможности адаптации к грядущим изменениям и приданием ТЭЦ несвойственных для них функций в части регулирования графика генерации электрической мощности. Также следует усилить подготовку студентов по специальностям кафедры «Тепловые электрические станции».

#### **Список использованных источников**

1. Романюк В.Н. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, В.А. Седнин, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 6. – С. 2–7.

2. Разработка мероприятий по режимной интеграции Белорусской АЭС в баланс энергосистемы: отчет о НИР/ Науч.-исслед. и проект. Республ. Унитарн. Предпр. «Белорусский теплоэнергетич. ин-т»; рук. Работы Ф.И. Молочко. – Минск, 2014. – 96 с. – № Б-14-7/1.

3. Романюк В.Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 4. – С. 2–9.

4. Романюк В.Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 6. – С. 3–8.

5. Андриющенко А.И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А.И. Андриющенко // Материалы четвертой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 24–25 апреля 2003 г. / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2003. – С. 12–14.

УДК 621.039

## **ТРЕНАЖЕРНАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ В БЕЛОРУССКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ДЛЯ ПЕРВОЙ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

*А.Л. Буров, А.А. Павловская*

*Белорусский национальный технический университет*

В рамках реализации Государственной программы подготовки кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь на 2009–2020 годы на энергетическом факультете Белорусского национального технического университета (БНТУ) в 2008 году открыта новая специальность 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций», выпуск специалистов по которой обеспечивает кафедра «Тепловые электрические станции» (ТЭС).

Строительство атомной электростанции является одним из стратегических направлений развития энергетики Беларуси, а подготовка собственных высококвалифицированных специалистов – одним из важнейших факторов реализации этого проекта.

Особенностью подготовки инженеров для энергетики, в особенности для работы на объектах атомной энергетики, является сочетание глубоких теоретических знаний и приобретенных практических навыков.

Строительство Белорусской АЭС потребует специалистов, способных обеспечить пуск и эксплуатацию энергоблоков с соблюдением требований ядерной и радиационной безопасности. При комплектовании штата АЭС необходим подготовленный оперативный персонал блочных щитов управления: ведущие инженеры по управлению реактором (ВИУР) и турбиной (ВИУТ).

Оперативный персонал в ходе своего обучения должен получить знания, достаточные для самостоятельной деятельности по управлению энергоблоком АЭС; развить навыки приема, оценки и переработки информации, принятия решений и их реализации, увязки сведений, получаемых от средств отображения информации, с ходом технологических процессов. Для будущих работников атомной электростанции важно понимать взаимосвязь меж-

ду состоянием технического оборудования и ходом технологического процесса, знать эталонные модели состояния объекта управления, цели и мотивы, которыми должен руководствоваться оператор в своей деятельности.

Поскольку трудовая деятельность кроме знаний требует умений и навыков, молодой специалист, попав на предприятие, проходит этап практической адаптации. И чем сложнее производственный процесс, тем более длительным будет этот период. Это требует пересмотра процесса подготовки и использования нового, системного подхода к обучению: структура подготовки специалистов для атомной энергетики в вузе должна согласовываться с требованиями подготовки оперативного персонала на АЭС.

В 2015 году в лаборатории была введена в учебный процесс специализированная учебно-исследовательская лаборатория «Турбинное отделение АЭС с ВВЭР-1000» создана в НИЯУ МИФИ и поставлена по заказу МАГАТЭ в Белорусский национальный технический университет.

Лаборатория «Турбинное отделение АЭС с ВВЭР-1000» обеспечивает практические занятия по спектру дисциплин специальностей, связанных с проектированием и эксплуатацией АЭС, управлением турбоагрегатом и его вспомогательными системами.

Целью обучения, реализуемого на базе лаборатории, являются:

- практическое освоение теоретических знаний по конструкции турбины и сопутствующему оборудованию, назначению и составу технологических систем турбогенератора и технологическим процессам в оборудовании, эксплуатационным режимам и принципам безопасной эксплуатации, назначению и структуре систем управления и защиты, принципам и алгоритмам управления турбогенератора;
- приобретение общих навыков по управления турбогенератором АЭС с реактором ВВЭР-1000 в режимах нормальной эксплуатации и режимах с нарушениями нормальной эксплуатации.



Рисунок 1 – Рабочая станция аналитического тренажера турбинного отделения



Рисунок 2 – Формат «Турбина» аналитического тренажера турбинного отделения

На рис. 1 и 2 представлены соответственно рабочая станция аналитического тренажера турбинного отделения и формат «Турбина», являющийся основным рабочим экраном тренажера.

В настоящее время тренажер «Турбинное отделение АЭС с ВВЭР-1000» реализует для студентов как режимы нормальной эксплуатации, так и аварийные режимы.

К режимам нормальной эксплуатации относятся такие режимы, как:

1. Пуск турбоагрегата
2. Останов турбоагрегата
3. Режимы нормальной эксплуатации
4. Режимы подачи питательной воды в парогенераторы:
  - включение в работу деаэрационной установки (заполнение и прогрев);
  - включение в работу тракта питательной воды (включение ВПЭН), ПВД, ввод в работу регуляторов уровня ПГ;
  - включение в работу турбопитательных насосов (ТПН);
5. Режим расхолаживания:
  - сброс пара из главного парового коллектора через БРУ-К (RC);
  - сброс пара из главного парового коллектора через БРУ-СН (RQ) в КСН (RQ), в ТК (RR).

К режимам работы с нарушением нормальных условий эксплуатации и аварии (срабатывание штатных аварийных защит турбоагрегата и оборудования) относятся такие режимы, как:

- увеличение осевого сдвига ротора;
- снижение давления масла в системе смазки;
- повышение давления пара на выходе из ЦВД;
- снижение давления пара в главном паровом коллекторе;
- повышение уровня в парогенераторе;
- отключение двух ТПН;
- отключение генератора от сети;
- отключение одного ТПН из двух работавших;
- отключение одного циркуляционного насоса из четырех в разных конденсатных группах;
- повышение скорости вращения ротора;
- снижение давления масла в системе автоматического регулирования;
- повышение уровня в ПВД до IV предела;
- повышение уровня в баках деаэратора.

В настоящее время тренажер эксплуатируется при проведении лабораторных работ по дисциплинам «АЭС», «Турбины АЭС», «Наладка и эксплуатация оборудования АЭС», «Вспомогательное оборудование АЭС», «Типовые элементы систем автоматического управления».

Важно отметить, что тренажер позволяет приобретать практические навыки не только студентам, но и преподавателям.

Также в рамках освоения и эксплуатации тренажера кафедра «Тепловые электрические станции» активно сотрудничает с разработчиками тре-

нажера – НИЯУ МИФИ, ведущими сотрудниками Южно-украинской АЭС, 3-й энергоблок которой является референтным для настоящего тренажера, а также Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), при активном содействии которого была осуществлена как поставка тренажера в БНТУ, так и его дальнейшее развитие как путем усовершенствования программного обеспечения, так и путем оказания поддержки в разработке учебно-методических материалов.

УДК 681.51. (075.8)

## КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Г.Т. Кулаков <sup>1)</sup>, А.Т. Кулаков <sup>1)</sup>, А.Н. Кухоренко <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет

<sup>2)</sup> Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь

Для повышения качества поддержания уровня воды в барабане парогенератора ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР предложен оптимальный ПИ-регулятор с наблюдателем состояния, который позволяет уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования при 10% возмущении расходом пара на 9%, а также сократить время регулирования на 18,8% по сравнению с типовой трехимпульсной системой автоматического управления (САУ) [1].

Поставлена задача существенного улучшения качества регулирования уровня воды в барабане парогенератора ПГВ-1000. Для решения этой задачи разработана комбинированная САУ, структурная схема моделирования которой представлена на рис. 1.

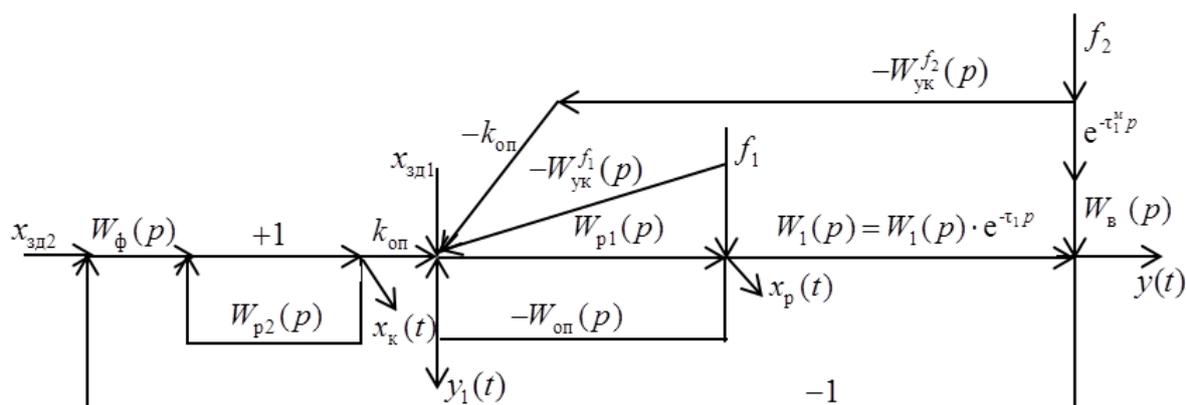


Рисунок 1 – Структурная схема комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором

В данной САУ передаточная функция оптимального корректирующего регулятора определена по формуле [2]:

$$W_{p2} = W_{\phi}(p) \frac{1}{1 - W_{зд2}(p)}, \quad (1)$$

где передаточная функция фильтра равна:

$$W_{\phi}(p) = \frac{W_{зд2}(p)}{W_1(p)}. \quad (2)$$

Здесь заданная передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$W_{зд2}(p) = W_{y, x_{зд2}}(p) = \frac{e^{-\tau_1 p}}{T_{зд2} p + 1}, \quad (3)$$

где  $T_{зд2} = 0,056\tau_1 = 11,742$  с.

При этом численное значение параметра оптимальной динамической настройки  $T_{зд3}$  в устройстве компенсации внешнего возмущения принята  $T_{зд3} = 0,09\tau_1 = 1,71$  с. (рис. 2).

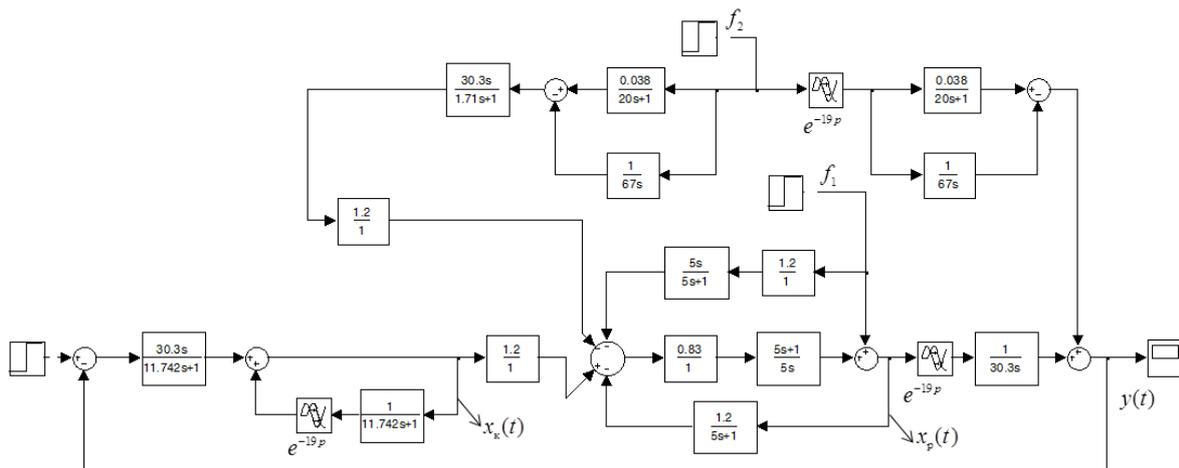


Рисунок 2 – Схема моделирования комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором

Графики переходных процессов комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором при основных возмущениях приведены на рис. 3.

Из анализа прямых показателей качества переходных процессов САУ (рис. 3) следует, что обработка задания происходит без перерегулирования с временем регулирования 75 с. Наиболее опасное внутреннее возмущение практически не отклоняет уровень воды в барабане парогенератора, а внешнее возмущение изменением расхода пара обрабатывается с максимальной динамической ошибкой в 61,5 мм водяного столба. Прямые показатели качества переходных процессов изменения уровня воды при возмущении расходом пара сравниваемых САУ приведены в таблице 1.

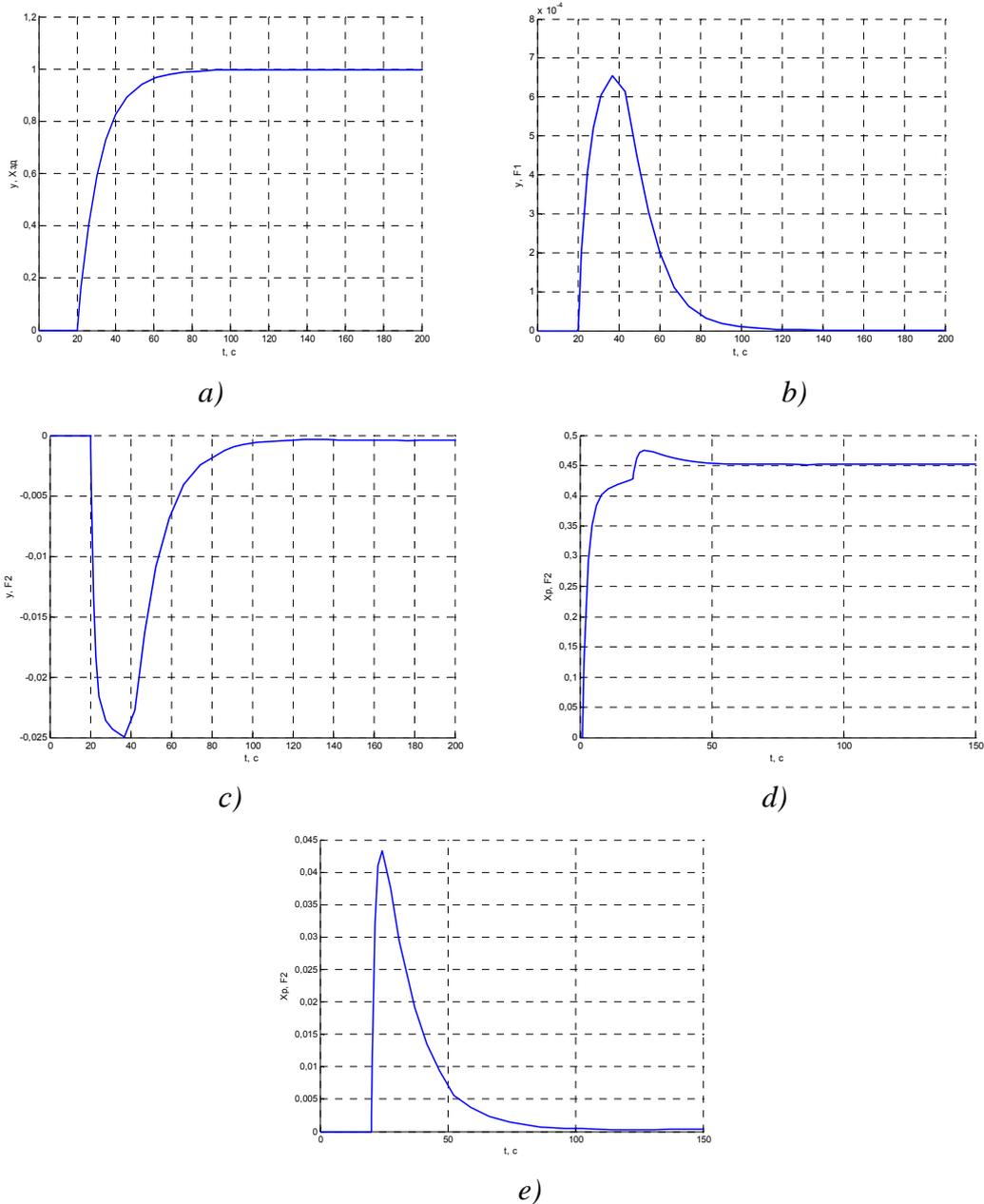


Рис. 3. Графики переходных процессов комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором при основных воздействиях:  
*a* – отработка скачка задающего воздействия  $x_{зд}$  ;  
*b* – отработка внутреннего возмущения  $f_1$  ; *c* – отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2^*$  ; *d* – изменения регулирующего воздействия  $x_p(t)$  при отработке внешнего возмущения расходом пара; *e* – изменения корректирующего воздействия  $x_k(t)$  при отработке внешнего возмущения расходом пара;  $t$  – время.

Прямые показатели качества при отработке возмущением  
расходом пара САУ различных структур

Наименование САУ	Показатели качества			
	$\Delta y / y_n$	$\Delta H_0$ , мм вод. ст.	$t_p$ , с	$\Delta X_p$ , %УПРК
Типовая трехимпульсная САУ [1]	0,034	83,6	160	8,3
САУ с наблюдением состояния [1]	0,031	76,0	130	15,7
Комбинированная САУ на базе оптимальных регуляторов (рис. 3)	0,024	61,5	75	11,3

При этом в качестве базы для сравнения был выбран переходный процесс в системе при скачкообразном 10 % возмущающем воздействии по расходу пара (полное время регулирования типовой трехимпульсной САУ составило 160 с; максимальный динамический заброс по уровню воды 83,6 мм водяного столба, максимальное изменение положения регулирующего питательного клапана при возмущении расходом пара – 8,3%). Оптимальный цифровой ПИ-регулятор с наблюдателем состояния обеспечил на 9% меньше максимальный динамический заброс по уровню и меньшее время регулирования (на 30 с), при изменении регулирующего воздействия – 15,7% [1]. Предложенная комбинированная САУ уровнем воды в барабане ПГ при плановом изменении нагрузки с использованием оптимальных регуляторов обеспечивает лучшие прямые показатели качества: время отработки возмущения расходом перегретого пара уменьшилось на 53,1%, максимальное динамическое отклонение по уровню сократилось на 26,4%. При этом изменение положения регулирующего питательного клапана увеличилось всего на 36,1%.

#### Список использованных источников

1. Демченко, В.А. Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 / В.А. Демченко [и др.] // Труды Одес. политехн. ун-та. – 2000. – Вып. 1. – С. 73–76.
2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.: ил.

**СЕКЦИЯ 2**  
**ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ**  
**ЭНЕРГИИ, СИСТЕМНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**  
**С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

УДК 621

**ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПУТЕМ**  
**ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ**

*С.В. Василевич, М.В. Малько, А.Н. Асадчий, В.Н. Богач, Д.В. Дегтерев*  
*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси*

Древесный уголь представляет собой микропористый высокоуглеродистый продукт, образующийся при пиролизе древесины без доступа кислорода. Этот продукт имеет разнообразное применение. Он используется в качестве топлива в домашнем хозяйстве и производстве железа и стали, при получении ряда других металлов, а также технического кремния и материалов для электродов, для производства углеродных сорбентов, используемых для адсорбционной очистки и разделения сложных смесей, а также для решения иных задач [1, 2].

На основе выполненных ранее в Институте энергетики НАН Беларуси исследований, связанных с термохимической конверсией биомассы, авторами была разработана пиролизная установка для получения древесного угля.

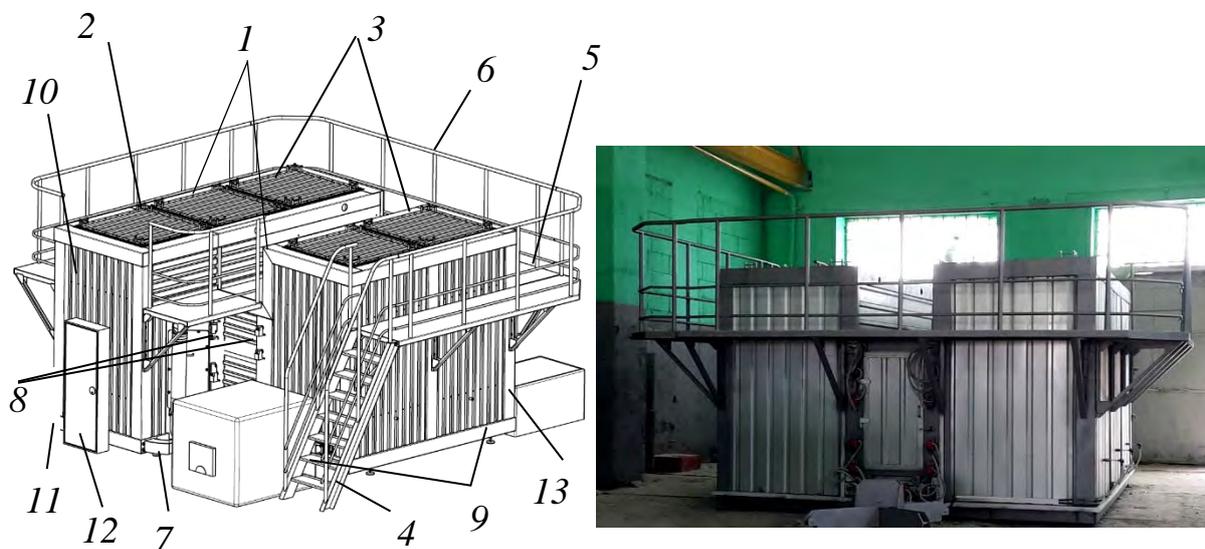


Рисунок 1 – Общий вид пиролизной установки ОП-800:

1 – рабочая камера, 2 – камера предварительной сушки, 3 – крышка, 4 – лестница,  
5 – площадка, 6 – ограждение, 7 – топка, 8 – электропривод заслонки, 9 – опора,  
10 – облицовка, 11 – основание, 12 – шкаф управления, 13 – система водоподготовки

Пиролизная установка ОП-800 (далее по тексту – установка) в соответствии с рис. 1 состоит из следующих основных узлов: реактора, представляющего собой моноблок из четырех теплоизолированных рабочих ка-

мер 1, и камеры предварительной сушки 2, размещенных на основании 11 с регулируемыми опорами 9. Сверху каждая камера закрывается съемными крышками 3. Реактор предназначен для размещения в камерах 1 корзин с сырьем (древесным материалом) и обеспечивает в каждой камере с установленной корзиной, соответствующего согласно технологии температурного режима (режим сушки, прокали, пиролиза, охлаждения). Соединение камер между собой осуществляется посредством системы трубопроводов (газовых коллекторов) с заслонками, обеспечивающих распределение газовых потоков между рабочими камерами, подвод дымовых газов из топки в рабочие камеры, подачу горючих пиролизных газов в топку и сброс дымовых газов из реактора согласно заданной программе.

Камера предварительной сушки 2 предназначена для предварительного нагрева древесины до температуры 50-70 °С за счет остаточного тепла, сбрасываемого реактором, и состоящей из теплоизолированного стакана с крышкой.



*a*



*б*

Рисунок 2 – Общий вид топочного устройства в момент розжига (а) и работы (б)

Камера соединена с дымососом и выпускным коллектором реактора. Топочное устройство 7, представляющее собой топку для сжигания твердого древесного топлива (при запуске реактора) (рис. 2а) и пиролизных газов, образующихся при работе реактора (рис. 2б). Система выброса дымовых газов, включает в себя дымосос и дымовую трубу, соединенную через камеру предварительной сушки 2 с выпускным коллектором реактора.

Система управления, состоит из шкафа 12 с блоком управления, заслонки с электроприводами 8, датчиков контроля температуры (термоэлектрические преобразователи, установленные на выходе из топки и во всех камерах реактора).

В процессе работы пиролизной установки ОП-800 в каждой камере последовательно проходят следующие этапы:

1. Загрузка. Предварительно загруженные сырьем корзины (рис. 3а) помещаются в камеры реактора, камеры закрываются крышками.

2. Сушка. В ходе процесса сушки осуществляется нагрев древесины до температуры 100-120 °С и испарение воды. Температура газов на выходе не превышает 200-220 °С. Сушка разделяется на два этапа. На первом этапе (нагрев и собственно сушка) относительная влажность доводится до 5%. Второй этап – досушивание осуществляется уже в процессе эндотермического пиролиза.

3. Эндотермический пиролиз. Эндотермический пиролиз осуществляется при температурах от 180 до 275 °С и требует подвода теплоты. Основными продуктами такого разложения являются низкомолекулярные соединения (вода, оксиды углерода, метанол, уксусная кислота и др.).

Сжигание парогазовой смеси продуктов данной стадии нерационально, поэтому они выбрасываются в атмосферу.



Рисунок 3 – Общий вид загруженного в корзину сырья (а) и полученного продукта (б)

4. Экзотермический пиролиз. Экзотермический пиролиз происходит в температурном диапазоне от 275 до 400 °С. На данной стадии обеспечивается интенсивный отвод тепла, а газы, образуемые в результате пиролиза, используются для сжигания в топочной камере.

5. Прокалка. Прокалка необходима для удаления остатков летучих веществ. Температура прокалки до 600 °С.

6. Охлаждение. Охлаждение до 150 °С осуществляется с использованием пара (водяными форсунками, установленными в каждой камере).

7. Выгрузка. Оператор снимает крышку камеры, достает корзину с продукцией (рис. 3, б). После выгрузки корзины из реактора происходит его полное остывание без доступа кислорода (накрывается стеклотканью). Процесс выгрузки совмещён с процессом загрузки.

Согласно проведенным испытаниям, получаемый древесный уголь имеет следующие характеристики: зольность – 0,7%; выход летучих веществ – 24,3%; низшая теплота сгорания – 28880 кДж/кг. Эти характеристики соответствуют требованиям для древесного угля марки А.

**Выводы.** На основе результатов выполненных ранее исследований разработана и изготовлена действующая пиролизная установка ОП-800 с вертикальными шахтами и выемными металлическими ретортами, осуществляющая полный цикл производства древесного угля от сушки сырья до охлаждения продукции. При этом тепловой режим в установке поддерживается благодаря сгоранию образующихся в процессе пиролиза газов и жидких продуктов. Производительность установки – 200 тонн древесного угля марки А.

#### **Список использованных источников**

1. Felicano-Bruzual C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO<sub>2</sub> reduction potential and economic prospects//J. Mater. Res. Technol, 2014. – Vol.3, No 3. – Pp. 233-243.
2. Alburquerque J.A., Calero J.M., Barron V. et al. Effects of biochars produced from different feedstoks on soil properties and sunflower growth. J. Plant Nutr. Soil.Sci // 2014. – V. 177. – Pp. 16-25.

УДК 621.311.6:621.311.001.57

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР–НАКОПИТЕЛЬ–ПОТРЕБИТЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВИЭ**

*К.В. Добрего, Г.Б. Ковтун, А.Д. Дубатовка  
Белорусский национальный технический университет*

Одним из трендов развития энергетики во всем мире является увеличение доли генерации за счет возобновляемых источников энергии. Снижение рыночной стоимости фотоэлектрических панелей, происходящее в последние десятилетия [1] приводит к тому, что солнечная электрогенерация становится экономически привлекательной, в том числе в странах с умеренным потенциалом солнечной энергии. При этом стоимость накопителей энергии не имеет тенденции к снижению. Поскольку ВИЭ развиваются в рамках систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП), вопрос экономической эффективности использования ВИЭ должен решаться путем оптимизации системы в целом.

Ввиду того, что прямые испытания и оптимизация систем ГНП требуют больших затрат, приобретает актуальность адекватное компьютерное моделирование таких систем. Для моделирования системы «генератор-накопитель- потребитель» требуются модели работы всех элементов этой системы, причем согласованные по детальности и методическим подходам. В коммерческих программах для расчета параметров автономных гибридных энергетических систем таких как HOMER, Hybrid2, HOGA [2], используются достаточно грубые статистические модели, что уменьшает их ценность как исследовательского инструмента и отсутствует доступ к кодам.

В работе [3] представлена имитационная модель потребления электроэнергии жилищно- бытового объекта, реализующая статистически правдоподобные графики нагрузки, учитывающие индивидуальные включения- выключения всех электропотребителей.

Моделирование метеозависимых источников энергии (солнечной и ветрогенерации) требует имитации соответствующих метеопараметров [4, 5]. Так для моделирования солнечной генерации используется модель внеатмосферной облученности («простая модель солнечного неба» [6]) и модель пропуска атмосферы, соответственно для ветрогенерации – модель графика силы ветра.

В настоящей работе представлена методика моделирования метеозависимых источников энергии на основе пошагового численного решения статистического уравнения Ланжевена, используемого для расчета броуновского движения частиц. Предложена методика определения параметров уравнения Ланжевена обеспечивающих выполнение статистических закономерностей соответствующих метеорологических процессов на трех временных масштабах, – автокорреляцию временного ряда значений параметров, вариабельность дневных и недельных распределений значений соответствующих параметров.

Так для облученности горизонтальной площадки можно записать

$$I(t) = 1.362 \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi d_n}{365} \right) \right) \cos \theta_z \cdot \sin \left( \frac{\pi(t - t_{rise})}{t_{set} - t_{rise}} \right) \times M(t),$$

где  $d_n$ ,  $\theta_z$ ,  $t_{rise}$ ,  $t_{set}$ ,  $M(t)$  – функция пропускания атмосферы от времени,  $M(t) \in [0,1]$ .

Модель пропускания атмосферы предполагает квазислучайное изменение пропускания атмосферы, подчиняющееся определенным статистическим закономерностям, делающим это изменение правдоподобным [7].

В качестве статистического уравнения примем уравнение Ланжевена

$$m \ddot{M} + \nu \dot{M} = F(M) + \tilde{f}(t), \quad (1)$$

где  $\nu$  – эффективная «вязкость» для изменения  $M$ ,  $m$  – коэффициент инерционности изменения  $M$ ,  $F(M)$  – силовое поле определяемое профилем потенциальной ямы, эквивалентной актуальному распределению вероятности того или иного значения пропускания (как правило, задаваемым Вейбулловским распределением)  $F_{WEI}(M)$ ,  $F(M) = const \cdot \partial F_{WEI}(M) / \partial M$ ,  $\tilde{f}(t)$  – стохастическая функция. Величина пропускания  $M$  не является физической координатой броуновской частицы, однако для наглядности можно исходить из механической интерпретации уравнения (11) и использовать понятия «инертность», «вязкость», «импульс» и «координата». Инерционный член

в (11) обеспечивает немарковский характер последовательности значений пропускания атмосферы, а вязкость препятствует быстрому изменению  $M$ .

Рассматриваем уравнение (12) в дискретном виде, и ищем его решение на пространственно-временной сетке  $M = M(t_0 + i \cdot \Delta\tau)$ . При этом функция  $\tilde{f}(t)$  не является непрерывной стохастической функцией с нулевым временем автокорреляции, а кусочно-постоянной случайной функцией времени.

Таким образом, модель определяется параметрами  $m$ ,  $\nu$ , амплитудой  $\tilde{f}(t)$ , характером силового поля  $F(M)$  и шагом по времени  $\Delta\tau$ . Естественным масштабом для «координаты» в этой задаче будет величина разрешения первичных данных о распределении атмосферного пропускания  $\Delta M$ , например, 0,1.

Исходными данными для имитационного моделирования являются: 1) статистическое распределение пропускания атмосферы для заданного месяца или среднегодовое (матожидание, дисперсия, профиль распределения Вейбулла или иной), входящее в (1); 2) время автокорреляции графика пропускания атмосферы по уровню 0.4,  $\tau_A$  характеризующее изменчивость пропускания на временах порядка часов; 3) значения вариабельности распределения пропускания (от недели к неделе и месяца к месяцу), характеризующие более долгосрочные особенности пропускания  $Var_{short}$ ,  $Var_{long}$ .

Под вариабельностью двух последовательных рядов, установленных за два последовательных периода времени  $F_1$  и  $F_2$  понимаем относительную величину среднеквадратичных отклонений этих распределений друг от друга

$$Var(F_1, F_2) = \frac{1}{\max(F_1)} \sqrt{\frac{1}{N_{\max}} \sum_i^{N_{\max}} (F_1(i\Delta x) - F_2(i\Delta x))^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  шаг по времени.

Поскольку уравнение (1) позволяет определить три независимых безразмерных комплекса, характеризующих процесс, то целесообразно определить их таким образом, чтобы каждый из них был связан со значением одного исходного параметра задачи.

Существенной особенностью предлагаемой модели является то, что амплитуда случайной силы воздействия определяется глубиной потенциальной ямы  $|\tilde{f}| \sim \sqrt{D(x)}$ .

Поиск параметров (1) наилучшим образом соответствующих необходимым требованиям по  $\tau_A$ ,  $Var_{short}$ ,  $Var_{long}$  относится к плохо определенным статистическим задачам. Решение ее предлагается решить в рамках алгоритма пристрелки. Для этого проводится значительное (порядка  $10^3$ ) количество индивидуальных расчетов величины пропускания атмосферы. Каждый расчет позволяет определить статистические параметры полученного временно-

го ряда и сопоставить их входным параметрам уравнения (1), представляет собой отображение  $(KK1, KK2, KK3) \rightarrow (\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$ , которое можно изобразить в виде статистического облака и найти корреляции  $\tau_A = Cor(KK1, KK2, KK3)$ ,  $Var_{short} = Cor(KK1, KK2, KK3)$ ,  $Var_{long} = Cor(KK1, KK2, KK3)$ . Соответственно можно определить и обратные корреляции  $KK1 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$ ,  $KK2 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$  и  $KK3 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$ .

В качестве примера исходных данных приведем распределение мощности генерации за день (6 июля 2016 года). Временной промежуток выборки – двенадцать часов (с 6:00 до 18:00), шаг – 10 минут (рис. 1), недельная вариабельность дневных распределений вырабатываемой солнечными батареями электроэнергии (1-7 июля 2016 года). По оси абсцисс указан порядковый номер сравниваемых дневных данных (1 соответствует сравнению первого и второго июля и т.д.).



Рисунок 1 – Дневное распределение вырабатываемой электроэнергии. Летний сезон, 6 июля 2016

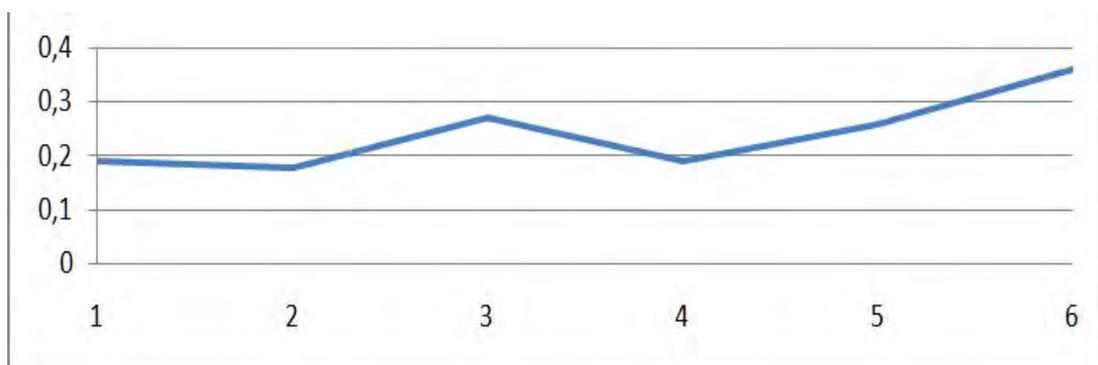


Рисунок 2 – Недельная вариабельность дневных распределений вырабатываемой солнечными батареями электроэнергии (1-7 июля 2016 года)

С помощью аналогичной стохастической модели задается изменение скорости ветра для моделирования ветрогенерации. Пример исходных данных для моделирования приведен на рис. 3 и 4.

**Выводы.** Использование стохастических моделей позволяет генерировать правдоподобные графики солнечной и ветрогенерации практически с высоким временным разрешением и, таким образом, проводить имитационное моделирование и оптимизацию автономных энергетических систем «генератор – накопитель – потребитель».

Построенные модели могут найти применение при оптимизации систем АСКУЭ, при решении экологических, сельскохозяйственных и других задач.

#### **Список использованных источников**

1. Bloomberg new energy Finance [<https://about.bnef.com/>]. Моделирование систем генератор – локальная энергетическая система.
2. Kondili E. Design and performance optimization of stand-alone and hybrid wind energy systems in Stand alone and hybrid wind energy systems. Ed.by J.K. Kaldellis, Woodhead Publ. Ltd., 2010.
3. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло. Наука и техника. – 2017. – Т.16, №2. – С. 160-170.
4. Taehong Sung, Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim. A Mathematical Model of Hourly Solar Radiation in Varying Weather Conditions for a Dynamic Simulation of the Solar Organic Rankine Cycle. Energies. – 2015. – V.8. – Pp. 7058-7069.
5. Philipoppoulos K., Deligiorgi D. Statistical simulation of wind speed in Athens, Greece based on Weibull and ARMA models. Int. J. of Energy and Environment. – 2009. – Issue4. – V.3. – Pp. 151-158.
6. Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation; Elsevier. – New York, USA, 1983.
7. Yuanshi Zhang, Aina Tian, Yanlin Pan. Research on Wind Power Simulation Model. Industrial Engineering, Machine Design and Automation (IEMDA 2014) & Computer Science and Application (CCSA 2014). Proceedings of the Congress. World Scientific Publ., 2015. – Pp. 14-130.

УДК 620.9

#### **СИСТЕМА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ**

*М.А. Комаревцев, А.Н. Попов, Д.А. Ярков  
Северный (Арктический) Федеральный Университет*

Гибридная энергоустановка представляет собой систему, работающую на основе традиционных и альтернативных источников энергии. Эта система позволяет решить такую проблему, как энергообеспечение удаленных населенных пунктов.

Основными трудностями энергоснабжения являются высокие затраты на топливо для дизельных электростанций (ДЭС), высокая степень износа энергооборудования, следствием чего является пониженная надежность работы.

Гибридная энергоустановка позволяет решить эти проблемы за счет модернизации энергооборудования путем замены изношенных линий электропередач (ЛЭП), аккумулирования энергии и снижения количества необходимого топлива, благодаря использованию возобновляемых источников энергии.

Для проекта было выбрано село Койда Архангельской области, находящееся на берегу Белого моря. Электрообеспечение осуществляется ДЭС мощностью 360 кВт, топливо доставляется по морю. Станция расходует 360 тонн топлива в год и обеспечивает электричеством 478 жителей. В дополнение к уже существующей ДЭС устанавливается ветровая электрическая станция (ВЭС). Последняя включает в себя 8 ветрогенераторов с номинальной мощностью 60 кВт каждый, 40 аккумуляторных батарей с единичной емкостью 200 Ач на один ветрогенератор, ЛЭП, контроллеры. В качестве нетрадиционного источника энергии был выбран ветер, исходя из непосредственной близости населенного пункта к морю, что характеризует его высокий ветровой потенциал (рис. 1 и 2).

Анализируя рис. 1, можно утверждать, что наибольшие скорости ветра наблюдаются с октября по февраль, а также в мае и июне. Согласно рис. 2 ветрогенератор работает 323 дня в год, учитывая, что стартовая скорость для этой модели – 2,5 м/с. Исходя из данных графиков, можно говорить о целесообразности использования ветра в качестве возобновляемого источника энергии в этой местности.

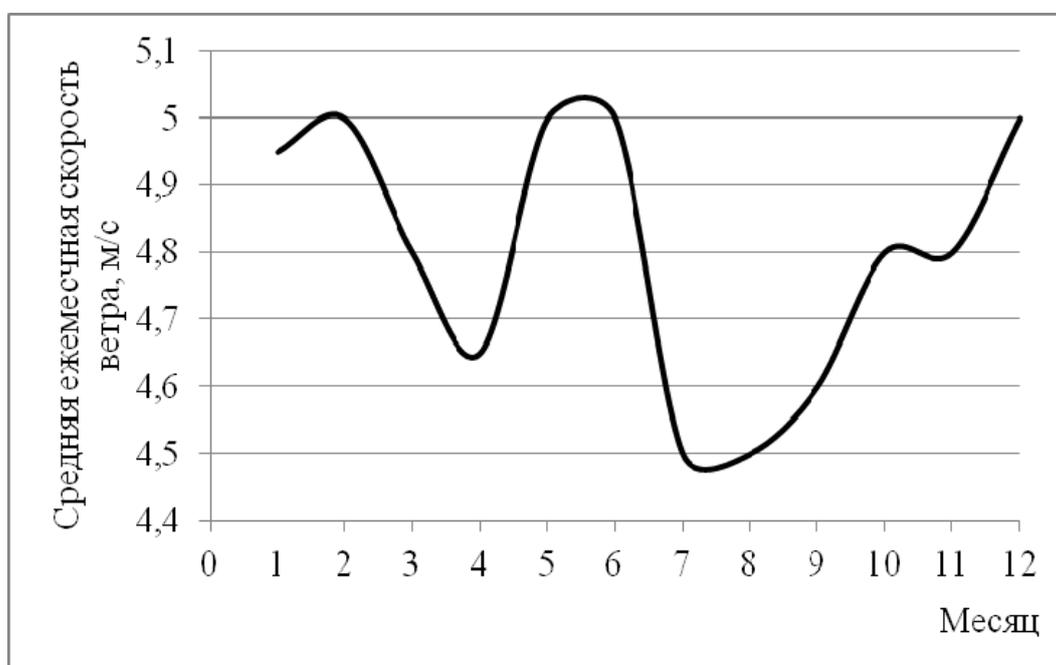


Рисунок 1 – Средние ежемесячные скорости ветра

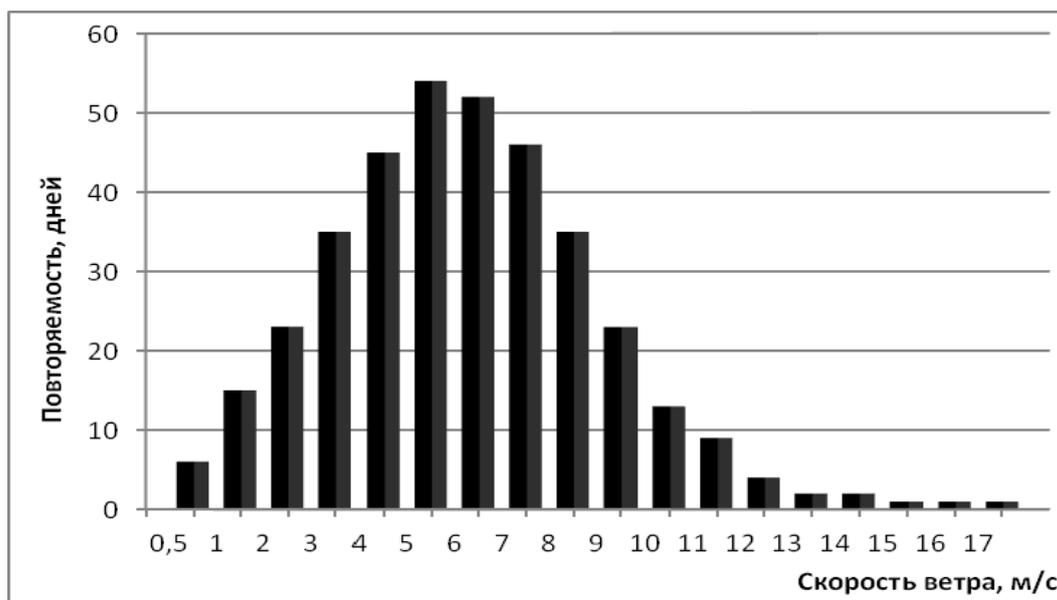


Рисунок 2 – Повторяемость скоростей ветра

После установки ветрогенераторов энергоснабжение села Койда и близлежащих населенных пунктов будет осуществляться в основном за счет энергии ветра. Для обеспечения потребителя необходимой мощностью при низкой скорости ветра или его полном отсутствии подключается дизель-генератор. Если наблюдается переизбыток мощности, то осуществляется непосредственная подзарядка аккумуляторных батарей. Такая схема позволяет бесперебойно снабжать населенные пункты необходимым количеством электрической энергии.

В настоящий момент в Северном (Арктическом) Федеральном Университете построена лаборатория, в которой проводятся исследования по использованию гибридных энергоустановок в условиях Севера. Эта лаборатория исследует работу следующих установок: ветрогенератор, солнечные панели, а также их взаимодействие с дизельным генератором.

УДК 620.9

## **ОРИГИНАЛЬНАЯ ТУРБИНА ДЛЯ МАЛЫХ НАПОРОВ И МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*Ф. Свитала*

*Люблинский Католический Университет, г. Люблин, Польша*

В современных условиях весьма актуальным направлением развития электроэнергетики во всем мире является использование возобновляемых источников энергии [4-13]. Их огромное преимущество – нанесение природной среде наименьшего экологического ущерба [14-19]. Человек сейчас умеет эффективно использовать гидравлическую энергию рек и больших течений. Вместе с тем, использование такой энергии требует очень больших финансовых средств из-за трудностей создания соответствующих напоров и емкостей водохранилища [20-21] для получения наиболее высокого и оп-

тимального коэффициента полезного действия (КПД) ее преобразования, а также большими затратами, связанными со строительством гидротехнических сооружений.

Водные массы нашей планеты обладают огромным потенциалом механической (течения, приливы, волны), тепловой (градиент температур), химической (градиент солености, биомасса) энергией, способы использования которой находятся только в начальной стадии разработки. В связи с этим такие источники энергии часто называют нетрадиционными, хотя более правильно определить их как первичные возобновляемые источники, которые возникают без участия человека, и вторичными возобновляемыми источниками при возобновлении которых участвует человек.

Самой старшей среди всех возобновляемых энергий является гидравлическая (водная) энергия. Все множество нетрадиционных запатентованных гидроэнергетических установок, пользующих механическую энергию воды (зарегистрировано более 300 патентов на их основное конструктивное решение с определенной долей условности), можно разделить на три класса [4-7]:

- использующие (преобразующие) энергию гидравлического давления водных масс;
- использующие кинетическую энергию воды, водных потоков;
- использующие энергию ветрового волнения.

Кроме этого, существует огромное количество технических решений по отдельным элементам проточного тракта гидроэнергетических установок, обеспечивающих улучшение условий течения потока в них и способствующих повышению КПД работы. Примерами таких решений могут служить разработки кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарского государственного архитектурно-строительного университета, приведенные в [22-32].

Использование малых напоров составляет проблему получения соответствующей эффективности и всегда притягивает изобретателей, которые развивают старые конструкции, совершенствуют их и разрабатывают методы их применения.

Разработку этого патента создали на кафедре Гидравлики Университета в Мюнхене.

Новое оборудование для использования малых напоров где использована конвейерная конструкция установки гидравлического двигателя для получения энергии воды. Машина СТЕФФ турбина работает, как конвейер, что показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Элементы конвейерной турбины

Основным элементами являются два ролика, которые опоясаны конвейером с профилированными лопатками. Вода поступает ниже верхнего ролика, который является приводной осью. Вес воды, которая поступает в турбину передает нагрузку на лопатки и через цепь нагружает их, создавая вращение за последствием цепи установленной на роликах. Этот крутящий момент принимает электрический генератор преобразовывает в электрическую энергию. Следующей аналогией является количество оборотов вала турбины что можно приравнять к колесу мельницы потому, что обороты его достигают 30-35 оборотов в минуту. При таком решении получается относительно высокий к.п.д. Первый патент по этой конструкции был признан в 2009 году, а двенадцать месяцев позже работала модель прототипа.

Первый экземпляр, который был приспособлен к испытаниям, создали в 2011 году, и был испытан в Швейцарии в городе Рути.



Рисунок 2 – Исследовательская установка в Швейцарии в городе Рути

Турбина во время испытаний показала свои преимущества и недостатки. Турбина показала высокое сопротивление на формирование льда

на конструкции, но показала тоже, а немного меньший коэффициент полезного действия, причиной чего был высокий уровень турбулентности и не полного оптимального наполнения турбинной камеры. На основе первоначальных испытаний проведено усовершенствование конструкции, и это было началом строительства большего по установленной мощности агрегата 10 кВт.



Рисунок 3 – Турбина СТЕФФ в зимних условиях

Модель была установлена на стенде и проверена с точки зрения к.п.д. Стендовые испытания проведено при, разных напора и расходах что позволило оптимизировать конструкцию в диапазоне напоров и расходов. Следующим шагом было установление турбины на натурные испытания в г. Рити в Швейцарии, которые показали высокую стойкость на внешние условия, и повышенный к.п.д. особенно при низких скоростях оборотов. Однако название «турбиной» не соответствует действительности, потому что ей ближе водяному двигателю, питающему генератор. При исследовании в натуре был изменён угол наклона и расход воды, для определения потерь гидросистемы и величины крутящего момента. Произведено исследование при изменяющемся, крутящим моменте в 393 точках работы водного двигателя. Наблюдения позволили определить максимальные коэффициенты полезного действия при разных наклонах, и разных напорах, и показано их на графике рис. 2. Доказано, что угловые скорости имеют большие влияние при определении конструкции оборудования для регулирования угловой скорости в зависимости от расхода. При расходе 400 л/с и небольших, углах наклона конвейера коэффициент полезного действия достигал 90%.

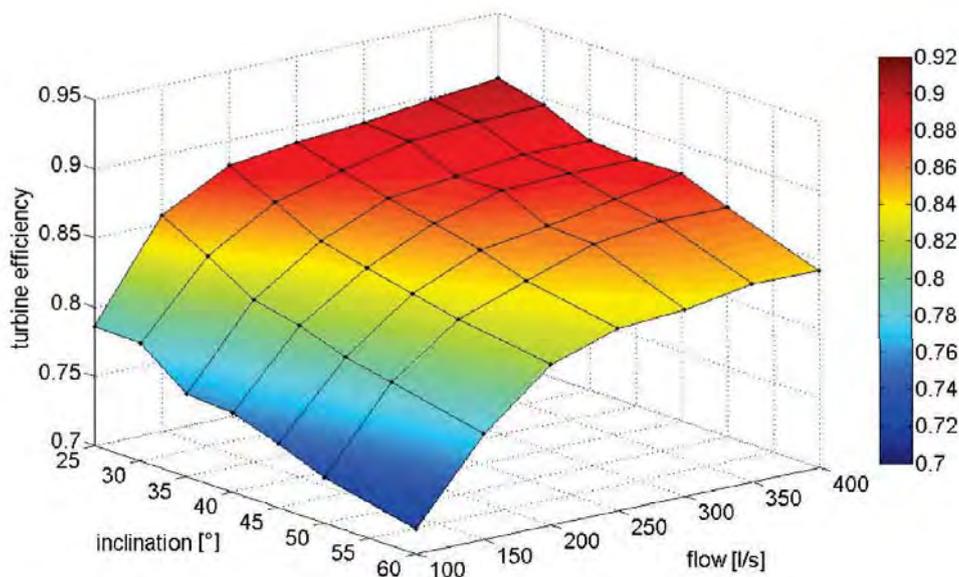


Рисунок 4 – Влияние расхода, и уклона, на к.п.д.

Испытания показали, что в области частичной нагрузки и увеличенных уклонах гидравлического двигателя характеристика к.п.д. становится более плоской в диапазоне 85-88%, причиной этого может быть разница крутящих моментов, которые различаются крутящего момента при номинальном расходе и потому надо делать дополнительную регулировку изменения величины оборотов. В анализе не учтено потерь в генераторе, преобразователи частоты, которые надо определять индивидуально для каждого случая. В приведенных величинах частично учтено потери на приводе воды в двигатель, а не прямо при переводе двигателя с работы в горизонтальном положении, в режим работы с уклоном. На лабораторном стенде были проведены тоже измерения громкости работы, которые показали величину 76дВ только из-за плеска воды.

Первый такой гидравлический двигатель установлено в Африке на плотине Ньянгао (Nyungano) в Танзании, используя напор 3,5 м, в 2014 году и с тех времен питает электричеством школу. На строительную площадку доставлено ее как представляет рисунок 5.



Рисунок 5 – Доставка гидравлического двигателя в Ньянгао Танзания

Установку при использовании местных строительных материалов и включение ее в работу заняло только семь дней, и здание школы получило электричество. Гидравлический двигатель, а дальше говоря гидрогенератор достигает в этих условиях 10 кВт мощности, в условиях использования действующих гидротехнических сооружений водохранилища.



Рисунок 6 – Гидроэлектростанция в Ньянгао (Танзания)



Рисунок 7 – Гидроагрегат мощностью 12 кВт, расходом 400л/с, напор 3,5 м

Следующий гидроагрегат был установлен на заводе очистки сточных вод в Швейцарии Ла Саунерие в Цоломбиер на выходе с бака очищенных сточных вод. Напор, который там создан это 4 м и позволяет получить 12 кВт на собственные нужды предприятия.

Реализация дальнейшего Стефф турбины проекта намечен на области вокруг Пармы (Италия). Две ирригационные системы приносили воду на пахотные земли, будет служить в качестве источника энергии, а мощность, таким образом, генерируемая будет подаваться в сеть.

Компактная Стефф турбина имеет широкий спектр применения. Реки и ручьи, плотины, отводы, водоочистные сооружения, системы орошения.

Наклон Стефф турбины можно отрегулировать в соответствии с местной топографией. В крайнем случае, можно генерировать электричество из кинетической энергии воды, стекающей по горизонтали. Электроэнергия, выраба-

тываемая на Steffturbine, может быть подана в ват на собственные нужды изолированного потребителя. Электрическую сеть, благодаря приспособляемости Стефф турбины, можно установить его без нарушения экосистемы.

### **Выводы**

1. В современных условиях актуальным направлением развития электроэнергетики является использование возобновляемых источников энергии, в частности, гидравлической энергии малых водных потоков. При этом целесообразно применять низконапорные гидроагрегаты упрощенного конструктивного исполнения, характеризующиеся сравнительно малыми затратами на строительство и малой стоимостью основного оборудования.

2. В качестве гидравлической турбины малых гидроэлектростанций рекомендуется применение конвейерной турбины Стефф, отвечающей современным требованиям по стоимости, а также обладающей хорошими энергетическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Малые гидроэлектростанции с конвейерными турбинами, наряду с отмеченными выше, обладают весьма важными положительными достоинствами экологической безопасности, в том числе, по отношению к рыбному поголовью из-за особенностей конструкции рабочего колеса практически не травмирующего особи рыб.

### **Список использованных источников**

1. [www.steffturbine.com](http://www.steffturbine.com)
2. Malcherek A., Kulisch H., Maerker C.: Die Steffturbine – eine auf einem Umlaufband beruhende Kleinwasserkraftanlage. WasserWirtschaft 10, 2011. – Pp. 30–33.
3. Maerker C., Trachsler M., Widmer F.: Ein Jahr Steffturbine in Rüti/Schweiz – Erfahrungen aus dem laufenden Betrieb einer Pilotanlage in der Schweiz. Wassertriebwerk 12, 2012. – Pp. 232–237.
4. Бальзанников М.И., Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования – Самара: СГАСУ, ООО «Офорт», 2008. – 331 с.
5. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. – СПб.: Наука, 2013. – 308 с.
6. Бальзанников М.И. Решение проблем развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии в Среднем Поволжье // Научная школа академика Ю.С. Васильева в области энергетики и охраны окружающей среды: Сб. научн. тр. СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 25-39.
7. Бальзанников М.И. Актуальные направления развития возобновляемой энергетики в Среднем Поволжье // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Вып. 8. – Н. Новгород: Нижегородский гос. арх.-строит. ун-т, 2005. – С. 173-185.
8. Бальзанников М.И., Пиявский С.А. Гидравлическое аккумулирование электроэнергии с использованием малых ГАЭС // Научное обозрение, 2014. – № 6. – С. 90-96.

9. Бальзанников М.И. Природоохранные и гидротехнические сооружения: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов: Материалы Международной научно-технической конференции. – Самара: СГАСУ, 2014.

10. Елистратов В.В. Использование возобновляемых источников энергии – путь к устойчивому развитию и энергоэффективности. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 3-1 (154). – С. 77-83.

11. Свитала Ф. Малые ГЭС на реке Слупия // Малая энергетика, 2005. – № 1-2. – С. 45-47.

12. Свитала Ф., Евдокимов С.В. Каскады малых ГЭС Польши // Энергоаудит, 2007. – № 1. – С. 36-37.

13. Бальзанников М.И., Евдокимов С.В., Галицкова Ю.М. Развитие возобновляемой энергетики – важный вклад в обеспечение защиты окружающей среды // Промышленное и гражданское строительство, 2014. – № 3. – С. 16-19.

УДК 620.91/98

## **РОЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОБАЛАНСЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

*В.Г. Григорьев, К.Ю. Шалабодова*

*Научный руководитель – Д.Б. Муслина*

*Белорусский национальный технический университет*

В настоящее время, повышение эффективности энергоснабжения и энергоиспользования является ключевой задачей ЕС и соседствующих с ним стран Восточной Европы. Недостаток собственных ископаемых источников энергии вынуждает общество использовать энергоресурсы более рационально и эффективно, развивать и внедрять альтернативные источники энергии более активно, чтобы контролировать изменение климата и загрязнение окружающей среды. Использование новейших технологий и инновационных подходов крайне актуально, поэтому энергетика является приоритетной отраслью науки и техники как в Беларуси, так и в странах ЕС и за ее пределами.

Собственные энергоресурсы Республики Беларусь можно разделить на две категории: минеральные источники, такие как нефть, горючие сланцы, природный газ и торф, а также возобновляемые источники энергии: биомасса, биогаз, гидро- и ветроэнергия и т.д. Однако, Беларусь не может покрыть полностью энергопотребление за счёт собственных энергоресурсов, так как её минеральные и возобновляемые ресурсы довольно ограничены. Страна вынуждена импортировать топливо и энергию. Доля чистого импорта первичного топлива в топливном балансе страны составляет порядка 86% [1].

Согласно статистики Международного энергетического агентства за 2015 г., потребление нефти в Беларуси составило 33,8 млн. т у.т., тем не менее большая часть нефти перерабатывается государственными нефтеперераба-

тывающими предприятиями (73,4%) или реэкспортируется (6,9 %). Только 6,9% потребности в нефти обеспечивается собственными запасами. Потребление природного газа на тот же период составило 22,3 млн. т у.т. (19,5 млрд. м<sup>3</sup>), из которого собственная добыча не превысила 1 %. Годовое потребление торфа и угля 1,1 млн. т у.т. и включает следующие виды: торф и торфяные брикеты (72,9%), уголь и кокс (27,1%) [1].

Можно отметить, что в Беларуси более 90% топливно-энергетических ресурсов обеспечивается за счет импорта нефти и газа, в то время как собственные ресурсы (торф, биомасса и древесные отходы) покрывают только порядка 10 % потребления. К тому же, в Беларуси нет достаточных запасов топливных и энергетических ресурсов. Природный газ по-прежнему остается ведущим видом топлива и занимает около 62,8% в структуре топливного баланса страны [1]. Постоянный рост цен на природный газ приводит к негативному влиянию на экономику Республики Беларусь, поскольку для ее покупки необходимы значительные средства. Кроме того, к 2020 году ожидается резкое увеличение стоимости ископаемых видов топлива, что потребует определенных инвестиций.

При рассмотрении ситуации с потреблением топлива на нужды генерации электроэнергии, ситуация такова, что доля природного газа возрастает уже до 97,8%, доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии крайне низкая – порядка 0,73% [2]. Чтобы исправить эту ситуацию правительство Республики Беларусь сконцентрировало усилия на строительстве АЭС и дальнейшем развитии возобновляемых источников энергии. В этой связи увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе Беларуси стало одним из приоритетных направлений экономической политики правительства страны.

В последнем обновлении энергетической и экологической политики Беларуси подчеркивается, что потребление ископаемого топлива должно быть уменьшено с вводом в эксплуатацию ядерной, ветровой, гидро- и биоэнергетики [3]. Кроме того, согласно Национальной программе развития местных и возобновляемых источников энергии, доля местных источников энергии в балансе первичной энергии должна быть не менее 32–34% к 2020 году, где биомасса, биогаз, энергия солнца и ветра и гидроэнергетика должны занимать ведущее положение [4].

В соответствии с национальными стратегиями в Беларуси планирует к 2020 году создать 3 каскадные системы ГЭС:

- Каскадная система «Неман» общей мощностью 37 МВт (Гродненская и Неманская ГЭС);
- Каскадная система «Западная Двина» общей мощностью 112 МВт (Полоцкая, Витебская, Бешенковичская и Верхнедвинская ГЭС);
- Днепровская каскадная система общей мощностью 20 МВт (Оршанская, Речицкая, Шкловская и Могилевская ГЭС).

В ближайшем будущем планируется внедрить дополнительные установки, работающие на биогазе (46 МВт) и на биомассе (117 МВт), а также

увеличить мощность ветровых установок от 25 до 200 МВт и солнечных электростанций до 258 МВт.

Полученные в ходе исследований предварительные оценки показывают, что в результате введения АЭС и всех перечисленных в энергетической стратегии мероприятий по строительству возобновляемых источников энергии, в 2030 г. произойдет значительная диверсификация структуры энергетического баланса производства электроэнергии в Беларуси. А именно доля природного газа в структуре генерации электроэнергии сократится до 33% по сравнению с нынешним уровнем в 97,8%, а АЭС будет покрывать порядка 52%, 15% придется на возобновляемые источники энергии.

### **Список использованных источников**

1. International Energy Agency [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2015&country=Belarus&product=ElectricityandHeat>. – Date of access: 08.10.2017.

2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika>. – Дата доступа: 08.10.2017.

3. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь, 9 авг. 2010г., №1180 // Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [Электронный ресурс].

4. Постановление СМ РБ от 10.05.2011 №586 Об утверждении Национальной программы развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы и признании утратившим силу постановления СМ РБ от 07.12.2009 № 1593 // Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [Электронный ресурс].

УДК 620.91/98

## **СТОЛЕТНЯЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ЛЕСНАЯ ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ**

*Ф. Свитала*

*Люблинский Католический Университет, г. Люблин, Польша*

После катастрофических паводков с июля 1888г, а особенно с конца июля 1897 г для территории Нижней Силезии, а конкретно Изерских Гор создано специальную программу, которая бы позволила минимализировать потери из-за паводков в будущем. Программа разработана немецкими инженерами, а особенно профессором Университета в Ахен, профессор Отто Интце, учитывал создание плотин, и ретенционных водохранилищ на территории Нижней Силезии. Профессор Отто Интце разработал также новую технологию строительства тяжелых (каменно-бетонных) плотин.

Профессор Отто Интце имел большой опыт в проектировании тяжелых каменно-бетонных плотин, проектировал плотины Пилиховице, Злот-

ники и Вжещыне. Плотина создает водохранилище с водосбором 300 км<sup>2</sup> на реке Квиса, которая является притоком реки Бобр. Строительные работы были начаты осенью 1901 года, управлял ими ктн.инж. Курт Бахман. Возведен тогда первый туннель, для строительства, для построения плотины использовано 32 тонны взрывчатки, 600 вагонов цемента, 20 тыс. кубометров песка, 2,4 тыс. кубометров известии, 460 тон стали. Строительные работы плотины закончено 15 июля 1905 года. Гребень плотины находится на уровне 282мнум, а ее объем составляет 62 тыс. м<sup>3</sup>. Параметры плотины и водохранилища в таблице 1.

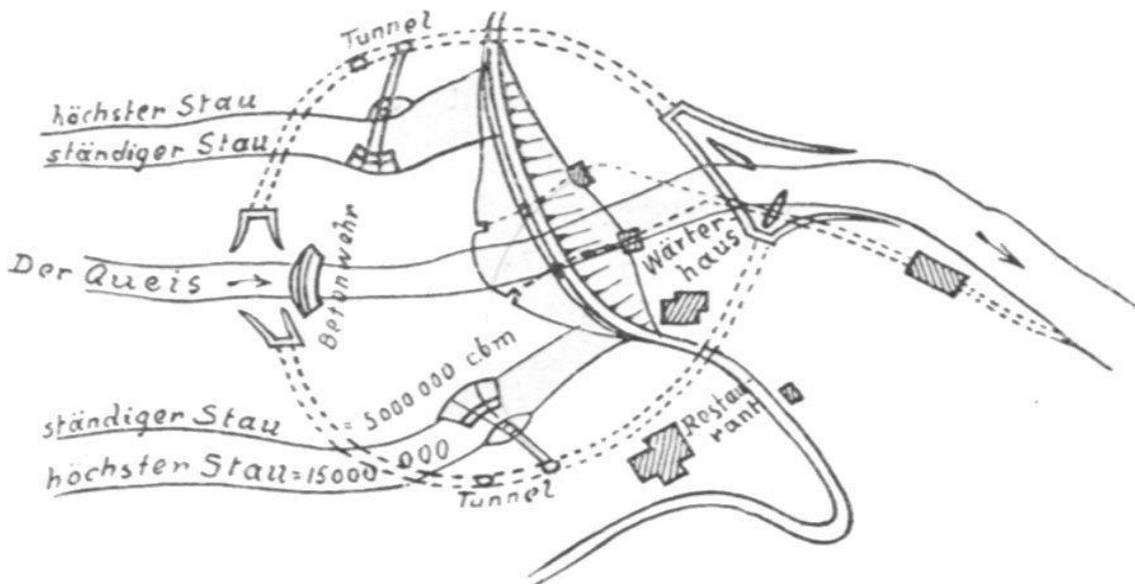
Таблица 1

Параметры плотины и водохранилища

<b>Параметр</b>	<b>Единица</b>	
Высота плотины	м	45
Длина по гребню	м	130
Толщина по гребню	м	38
Толщина по подошве	м	8
Емкость	млн м <sup>3</sup>	15
Площадь	га	140
Длина водохранилища	км	7

Гидроэлектростанция Лесная расположена на юго-западе Польши является первой заводской гидроэлектростанцией, построенной на территории современной Польши. Плотина, здание гидростанции, ее конструкция, являются эффектом самого высокого мастерства проектировщиков и строителей, можно сказать это произведение искусства сохраняющего увлекательную уникальность ландшафта, и места в мире окружающей природы.

Строитель, инженер Курт Бахман, расширил проект плотины в гидроэлектростанцию. В 1905 году началось строительство гидроэлектростанции, машинный зал расположен 100 м ниже плотины. Отводящие туннели для удержания уровня воды в водохранилище с расходом 660 м<sup>3</sup>/с. Водохранилище приняло первую паводковую волну в 1905 году во момент окончания строительства Плотины, а начало строительства гидроэлектростанции.



Сageplan der Talperre bei Markliffa. (1 : 5000.)

Рисунок 1 – Концепция гидроузла Лесная

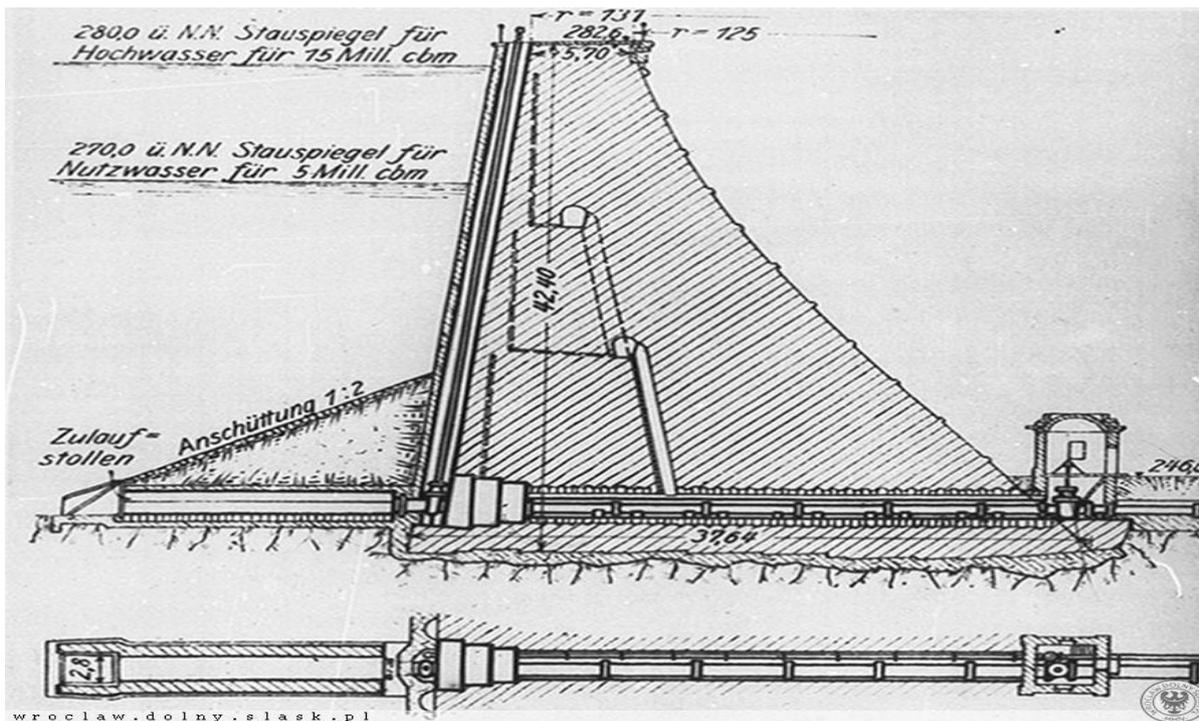


Рисунок 2 – Разрез через плотину

Вид здания гидроэлектростанции, размещение первых четырех гидроагрегатов рис. 3.

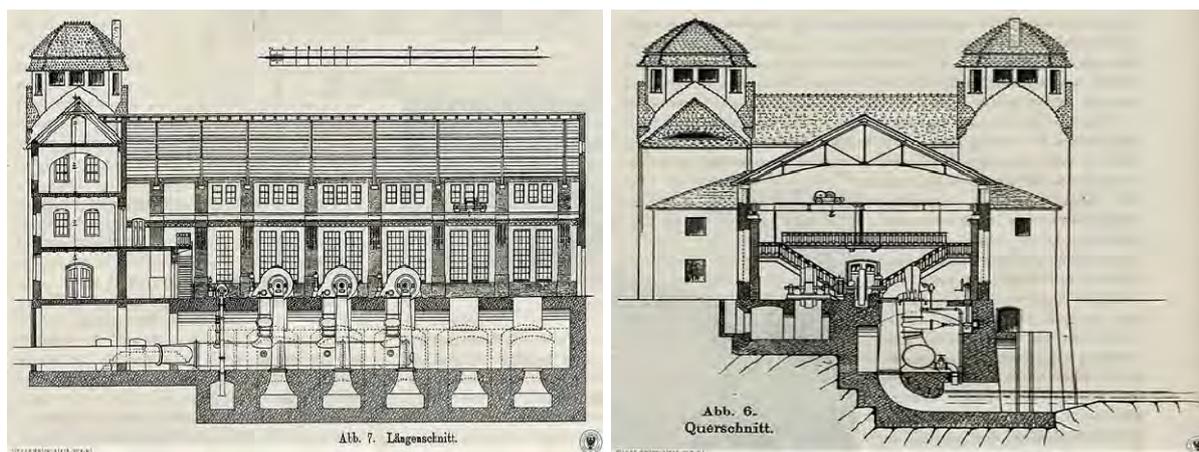


Рисунок 3 – Здание ГЭС с тремя гидроагрегатами, первая очередь

Первые четыре гидроагрегата были введены в эксплуатацию в 1907 году, а два следующих – в 1908 году. Параметры этих гидромашин приведены в таблице 2.

Таблица 2

#### Параметры гидроагрегатов

	Параметр	Единица	Агрегат 1, 2, 3, 4	5	6
1	Установленная мощность	кВт	515	515	35
2	Достигаемая мощность	кВт	550	550	30
<b>Турбина</b>					
1	Год строительства		1907	1908	1908
2	Тип		РО	РО	РО
3	Производитель		<b>Воитх</b>		
4	Установленная мощность	кВт	526	526	20
5	Расход	м <sup>3</sup> /с	2,75	2,75	0,15
6	Напор	м	26	26	26
7	Обороты	обр/мин	375	375	1000
<b>Генератор</b>					
1	Год строительства		1907	1908	1964
2	Производитель		<b>ССВ</b>		Польша
3	Установленная мощность	кВт	620	620	
4	Мощность	кВт	496	496	35
5	cosφ		0.8		
6	Напряжение	кВ	10	10	0,4
7	Ток	А	35,8	35,8	
8	Обороты	обр/мин	375	375	1000

Размещение некоторых гидросооружений водохранилища представляет рис. 4, где характерными для этой конструкции являются колодезные проливы для поводковой воды.



Рисунок 4 – Вид машинного зала

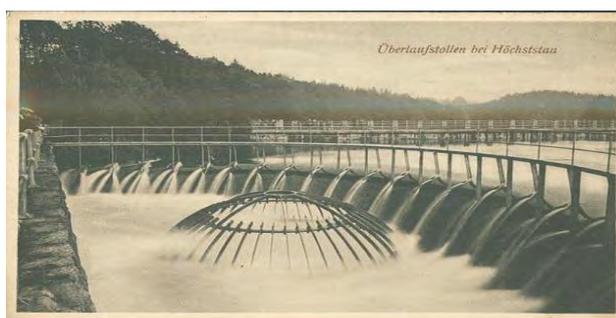


Рисунок 5 – Колодцы сброса поводковых вод



Рисунок 6 – Вид с плотины на здание гидроэлектростанции



Рисунок 7 – Колодец отвода поводковых вод

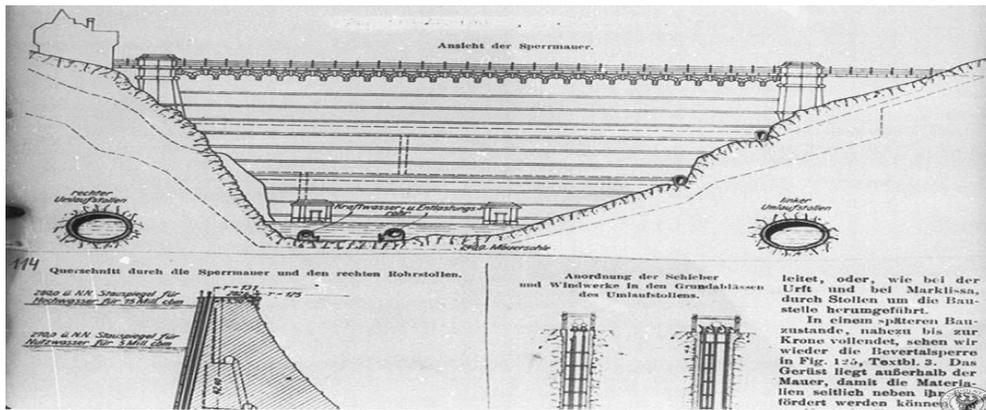


Рисунок 8 – Вид плотины с проекта

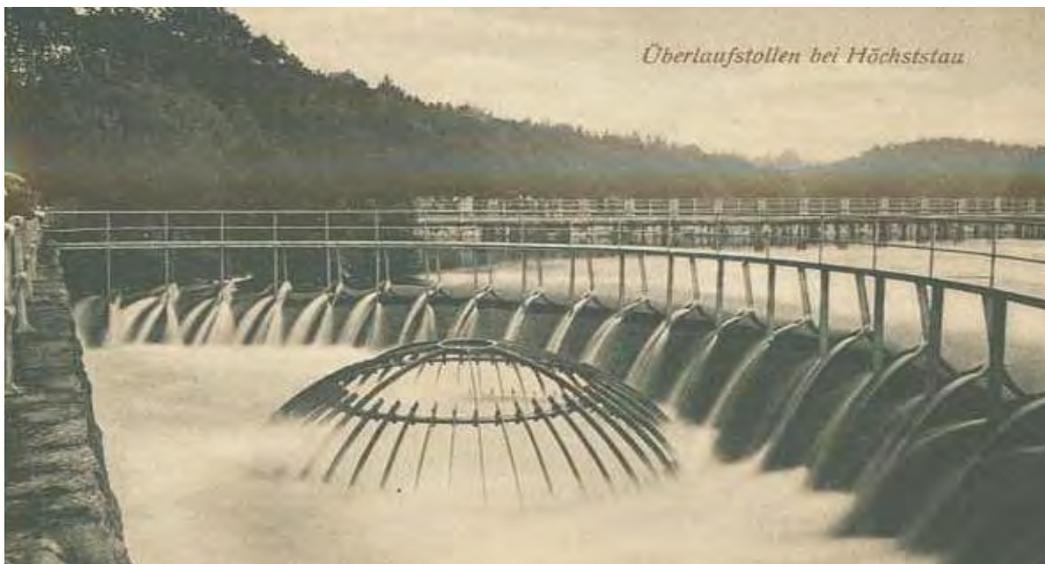


Рисунок 9 – Пролив воды в колодцы

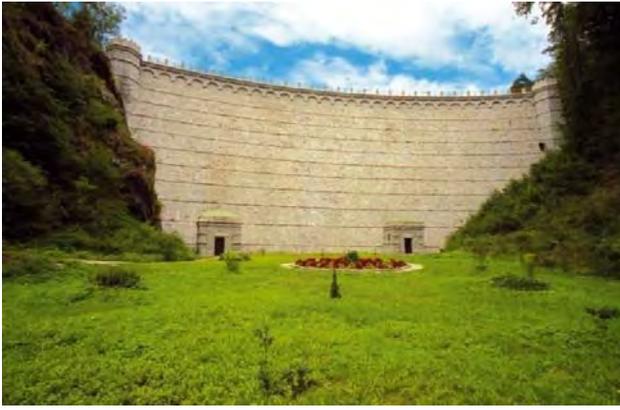


Рисунок 10 – Вид от верхней воды

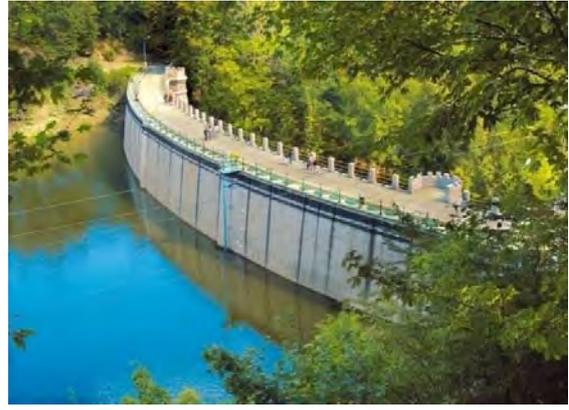


Рисунок 11 – Вид плотины с низу

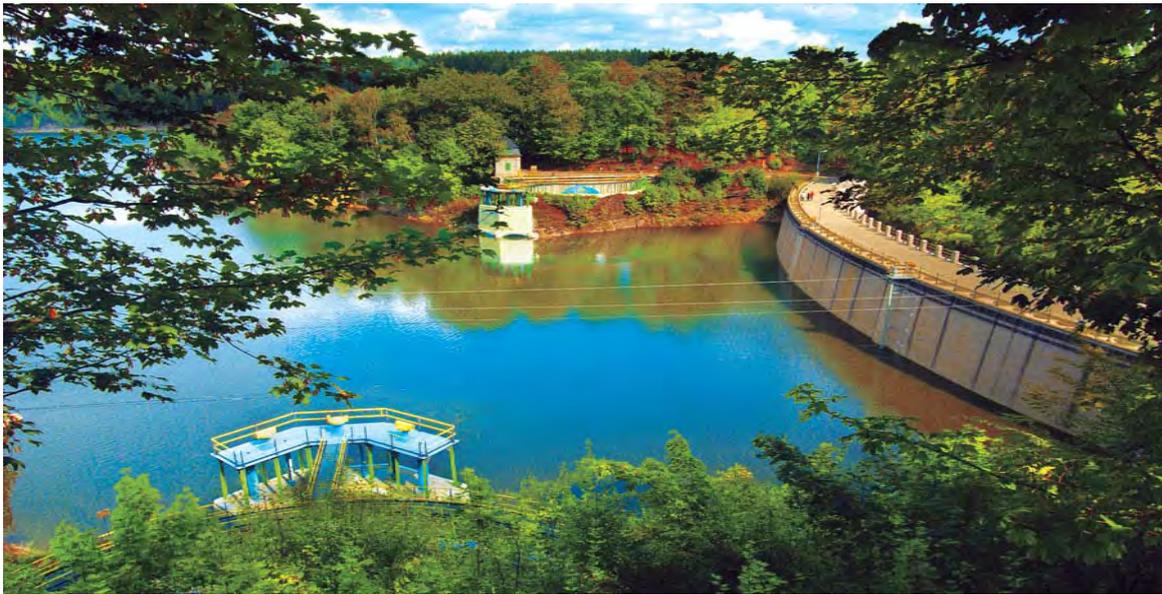


Рисунок 12 – Водохранилище

Гидроэлектростанция по сей день сохраняет первоначальные двигатели и уникальные решения, такие как бак для воды и сброса устройства.

С архитектурной точки зрения гидроэлектростанция является примером эклектики. Корону плотины венчает аркадой фриз подшипника признаки неоклассицизма. Ближе к правой упора гребня плотины становится неоготическом башню. Выход из обращения туннеля оформлен с надстройкой в виде парапета. Полукруглые формы характерны конце модерна, где рядом органические формы, на первый план выходят геометрические элементы.

Созданное водохранилище выполняет три функции энергетическую, противопаводковую и рекреационную. На берегу рок мыса водохранилища находится прекрасный и интересный замок Чоха, а на противоположной стороне остатки замка Райско.

### Список использованных источников

1. www.steffturbine.com
2. Malcherek A., Kulisch H., Maerker C.: Die Steffturbine – eine auf einem Umlaufband beruhende Kleinwasserkraftanlage. WasserWirtschaft 10, 2011. – Pp. 30–33.
3. Maerker C., Trachsler M., Widmer F.: Ein Jahr Steffturbine in Rüti/Schweiz – Erfahrungen aus dem laufenden Betrieb einer Pilotanlage in der Schweiz. Wassertriebwerk 12, 2012. – Pp. 232–237.
4. Бальзанников М.И., Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования – Самара: СГАСУ, ООО «Офорт», 2008. – 331 с.
5. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. – СПб.: Наука, 2013. – 308 с.
6. Бальзанников М.И. Решение проблем развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии в Среднем Поволжье // Научная школа академика Ю.С. Васильева в области энергетики и охраны окружающей среды: Сб. научн. тр. СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 25-39.
7. Бальзанников М.И. Актуальные направления развития возобновляемой энергетики в Среднем Поволжье // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Вып. 8. – Н. Новгород: Нижегородский гос. арх.-строит. ун-т, 2005. – С. 173-185.
8. Бальзанников М.И., Пиявский С.А. Гидравлическое аккумулирование электроэнергии с использованием малых ГАЭС // Научное обозрение, 2014. – №6. – С. 90-96.
9. Бальзанников М.И. Природоохранные и гидротехнические сооружения: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов: Материалы Международной научно-технической конференции. – Самара: СГАСУ, 2014.
10. Елистратов В.В. Использование возобновляемых источников энергии – путь к устойчивому развитию и энергоэффективности. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2012. – №3-1 (154). – С. 77-83.
11. Свитала Ф. Малые ГЭС на реке Слупия // Малая энергетика, 2005. – №1-2. – С. 45-47.
12. Свитала Ф., Евдокимов С.В. Каскады малых ГЭС Польши // Энергоаудит, 2007. – №1. – С. 36-37.
13. Бальзанников М.И., Евдокимов С.В., Галицкова Ю.М. Развитие возобновляемой энергетики – важный вклад в обеспечение защиты окружающей среды // Промышленное и гражданское строительство, 2014. – №3. – С. 16-19.

**О РАСТУЩЕЙ РОЛИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ЭНЕРГИИ В ОБЩЕМИРОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РФ**

*Г.А. Стройков*

*Санкт-Петербургский горный университет*

*Аннотация.* Данная аналитическая статья представляет собой обзор причин и факторов развития возобновляемой энергетики в мире. Глобальные тренды однозначно указывают на социальные, экономические и технологические предпосылки развития возобновляемой энергетики в мире. В работе затронут вопрос международных обязательств по ограничению выбросов парниковых газов, основные показатели, характеризующие развитие возобновляемой энергии - динамика производства в мире и в отдельных странах, структура производства возобновляемой энергии по источникам генерации, инвестиции в данную отрасль. Рассмотрены последние новости в вопросе повышения эффективности работы солнечных модулей, снижение их себестоимости, возможности широкого применения монокристаллических солнечных панелей и развитие технологий высокоэффективных многопереходных модулей, фотоэлементов на основе перовскита, а также разработка новых технологий систем хранения энергии. Особое внимание уделено перспективам развития возможностей использования возобновляемых источников энергии для предприятий горной промышленности, расположенных на территории Дальневосточного федерального округа России.

В декабре 2015 г. в Париже прошла 21-я конференция РКИК ООН. По результатам конференции было принято так называемое «Парижское соглашение». Подписание соглашения началось 22 апреля 2016 г., и к июню 2016 г. Под соглашением поставили подписи представители 177 стран.

Парижское соглашение об изменении климата, дало мощный дополнительный импульс развитию возобновляемых источников энергии. Из 177 стран, подписавших Соглашение, только 11 упомянули в своих планах ядерную энергетику и только 6 фактически утверждают, что они предполагают расширить её использование: Беларусь, Китай, Индия, Япония, Турция и ОАЭ. В то время как 144 страны упомянули использование возобновляемых источников энергии и 111 стран озвучили цели или планы по расширению их использования.

Россия тоже подписала Парижское соглашение, но ратифицировать его пока не спешит. Отношение к климатической мировой повестке в России противоречивое. Ратификация Парижского соглашения намечена на 2019–

2020 годы; до этого, кстати, планируется подготовить доклад о ее целесообразности, который ляжет на стол президенту.

Главными показателями, характеризующими развитие возобновляемых источников энергии, являются динамика производства возобновляемой энергии в мире и в отдельных странах, структура производства возобновляемой энергии по источникам генерации, инвестиции в данную отрасль и их рентабельность.

По официальным данным Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), производство возобновляемой энергии в мире за период 2006-2015 годов почти удвоилось, с 1,03 млн. до 1,96 млн МВтч.

Установленная мощность возобновляемой энергетики во всем мире по итогам 2016 г впервые превысила 2 тысячи гигаватт, достигнув 2 006 ГВт (в 2007 году было всего 989 ГВт). 56% этой величины или 1 122 ГВт приходится на гидроэнергетику.

Прирост мощностей ВИЭ за 2016 год составил рекордные 161 ГВт. Солнечная энергетика впервые обогнала ветроэнергетику по приросту. 71 ГВт новых мощностей зафиксировала IRENA в солнечной генерации и 51 ГВт в ветроэнергетике. Прирост в гидроэнергетике: 30 гигаватт.

Годовой процент роста возобновляемой энергетики в целом составил 8,7%, что соответствует тренду, отмечаемому с 2009 года (рост на 8-9% в год). 58% новых мощностей ВИЭ пришлось на Азию, где, кроме того, зафиксирован рост выше среднего – 13,1% за год [3].

Группа инженеров из Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии США (NREL), Швейцарского центра электроники и микротехнологии (CSEM) и Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL) разработала солнечные модули с многопереходной структурой и рекордными показателями эффективности. Чтобы добиться максимального КПД, ученые экспериментировали с кремниевыми модулями и различными полупроводниковыми материалами III-V группы. Двухпереходные солнечные панели на основе гетеропереходного кремниевого модуля и верхнего модуля из арсенида галлия (GaAs) продемонстрировали КПД 32,8%, побив предыдущий рекорд ученых. В 2016 году эффективность составляла 29,8% при похожей структуре. Инженеры также создали трехпереходные модули со слоем фосфида галлия индия (GaInP) с КПД 35,9% [4].

Китай. Изучая вопрос поиска новых технологий, решений и производства солнечных модулей и других компонентов солнечной энергетики, а также темпы роста возобновляемой энергетики в стране, можно сделать однозначный вывод, что Китай – один из лидеров в этой сфере. В рамках программы Top Runner 2017 Китай планирует повысить мощность солнечных установок в стране на 8-10 ГВт и наладить массовое производство монокристаллических солнечных панелей с высоким КПД.

С этой технологией китайские производители солнечных панелей смогут производить более эффективные модули по сниженной цене, отмечает Reuters. Производимые в КНР монокристаллические модули уже по-

что сравнивались по стоимости с поликристаллическими. Первые стоят \$0,319 за ватт, а вторые – \$0,225 за ватт [5].

Монокристаллические модули лишь еще один этап на пути развития технологий солнечной энергетики. Следующая стадия предполагает создание долговечных и высокоэффективных многопереходных модулей, а также фотоэлементов на основе перовскита.

Развитие возобновляемых источников энергии подталкивает к разработке технологий аккумулирования, а те, в свою очередь, обеспечат дальнейшее раскрытие потенциала «зеленой» энергогенерации. Возобновляемые источники энергии, при всех их положительных качествах, в своей производительности непостоянны и поэтому недостаточно надежны, чтобы стать основным энергогенерирующим активом стабильной энергосистемы. Именно поэтому развитая система аккумулирования обеспечит создание в будущем «зеленой», «умной» энергосистемы – как глобальной, так и локальной.

Подводя предварительные итоги развития российской возобновляемой энергетики в 2017 году, Алексей Текслер – первый заместителем Министра энергетики Российской Федерации, отметил, что отрасли удалось удержать хорошую динамику роста – количественного и качественного. За два предыдущих года в России были построены и введены порядка 130 МВт объектов ВИЭ. По итогам 2017 года ожидается завершение строительства ещё столько же – 130 МВт солнечных и ветровых электростанций. 70 МВт из них уже введено в эксплуатацию.

В солнечной энергетике сегодня уже создана полная производственная цепочка – от науки и производства солнечных модулей до строительства и эксплуатации СЭС. Важным событием в этой связи стала модернизация завода по производству солнечных модулей в Чувашской республике с увеличением его мощности до 160 МВт в год. Эффективность новых модулей и панелей, производимых по отечественной гетероструктурной технологии – более 20%, что соответствует лучшим мировым образцам [7].

В горнодобывающем секторе используется 11% всей мировой энергии. В среднем, затраты на энергию составляют 15% от общей стоимости производства. При добыче металлов этот показатель возрастает до 20-40%.

На территории Дальнего Востока, по данным информационного портала «Дальний Восток. Недропользование», на 1 августа 2016 года зафиксировано 984 компании, связанные с горнодобывающей и перерабатывающей деятельностью [8].

Вместе с тем, на Дальнем Востоке сконцентрирован огромный энергетический потенциал. Дальний Восток – это такой регион-парадокс. Это источник многих проблем и одновременно территория с колоссальным потенциалом для роста. Огромные расстояния, суровый климат, наводнения, обветшалость общей инфраструктуры, а порой и полное ее отсутствие, малонаселенность.

Поправки к закону «Об охране окружающей среды» вводят в законодательство РФ понятие «парниковые газы» и обязывают компании с начала 2018 года отчитываться об их выбросах. Разработанный в Минэкономки и не получивший возражений Минприроды, Минэнерго и Минфина законопроект проходит финальную стадию согласования, в том числе с бизнес-объединениями [10].

Подводя итоги, можно с уверенностью сказать, что одним из главных регионов для развития возобновляемых источников энергии является Дальний Восток. Потенциал ВИЭ по замещению дизельной генерации промышленных потребителей, расположенных на удаленных участках и вне систем энергообеспечения Дальнего Востока, чрезвычайно велик. Есть все основания полагать, что генерация энергии на базе ВИЭ в ближайшие годы будет во многом определять облик энергетики Дальнего востока.

### **Список использованных источников**

1. Глава ООН призвал добиваться развития энергетики будущего, Центр новостей ООН, январь 2016, [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.un.org/russian/news/story.asp?NewsID=25262#.WKdGvW\\_yiHs](http://www.un.org/russian/news/story.asp?NewsID=25262#.WKdGvW_yiHs)

2. Стройков Г.А. «Экономический потенциал развития возобновляемой энергетики и ее роль в горной промышленности», (104) УЭКС, 10/2017.[Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://uecs.ru/index.php?option=com\\_flexicontent&view=items&id=4563](http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=4563)

3. Возобновляемая энергетика: официальная статистика от IRENA, 31.03.2017 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://renewable-energy-official-statistics-from-irena/>

4. Н. Аванесюк «Установлен новый рекорд КПД многопереходных солнечных модулей», 30.08.2017 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://hightech.fm/2017/08/30/nrel\\_cell\\_efficiency](https://hightech.fm/2017/08/30/nrel_cell_efficiency)

5. Н. Аванесюк «Китай наладит массовый выпуск солнечных панелей с высоким КПД», 15.09.2017 г.[Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://hightech.fm/2017/09/15/china\\_mass\\_market\\_pvs](https://hightech.fm/2017/09/15/china_mass_market_pvs)

6. Анна Литвинюк «Системы хранения энергии. Итоги года.» 19.12.2016 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://elektrovesti.net/50689\\_itogi-goda-sistemy-akkumulirovaniya-energii](http://elektrovesti.net/50689_itogi-goda-sistemy-akkumulirovaniya-energii)

7. Алексей Текслер на «Российской энергетической неделе»: возобновляемая энергетика в России показывает количественный и качественный рост, 04.10.2017 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/9455>

8. NEDRADV-новостной портал о недропользовании [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://nedradv.ru/>

9. ТАСС «Дальний восток: энергетика роста», ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://tass.ru/rushydro-dv/energetikadv/2181563>

10. Давыдова А. Парниковые газы вписывают в закон // Коммерсант 01.03.2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3229089>

УДК 620.91/98

## **ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТРОВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПОСЕЛКА СОЛОВЕЦКИЙ**

*А.И. Кангаш, Н.Р. Наумов, П.А. Марьяндышев*

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова*

***Аннотация.** В данной статье рассмотрена проблема энергообеспечения островных территорий Арктической зоны Российской Федерации. Проанализированы действующие системы энергообеспечения Соловецких островов с расчетом нагрузок на производство электрической и тепловой энергий, рассчитаны выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от дизель-генераторных установок и водогрейных котлов. Выявлена необходимость снижения выбросов загрязняющих веществ. Одним из вариантов решения проблемы является применение альтернативных источников энергии.*

**Введение.** Необходимость уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу заставляет обратить внимание на текущую ситуацию в мировой энергетической системе. Переход от ископаемого топлива к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) является ключевой стратегией, направленной на сохранение климата, защиту окружающей среды. В мире насчитывается более 50 000 островов, на которые приходится 17% общей площади суши [1]. В настоящее время существует ряд проблем, связанных с энергообеспечением островных территорий. Острова, находящиеся в удалении от материка, часто зависят от импорта ископаемого топлива, которое обычно является дорогостоящим из-за транспортных издержек. Еще одной проблемой являются климатические условия, которые также усложняют доставку топлива. Поэтому удаленные острова часто обеспечивают идеальные условия для технико-экономического обоснования создания независимых энергетических систем, основанных на использовании альтернативных источников энергии [2].

Существует ряд опубликованных работ по энергообеспечению островных территорий. В основном, эти работы описывают систему электроснабжения территорий, находящихся в южных районах, где нагрузка на производства тепловой энергии либо отсутствует, либо имеет небольшие значения.

Мальдивские острова для энергообеспечения используют дизельные электростанции, топливо для которых доставляют с материка. Согласно [3], потенциал солнечной, ветровой энергии и энергии биомассы Мальдивских островов составляет  $9.51 \times 10^{11}$  кВт/год, что намного больше, чем годовое потребление энергии островами.

В [2] проведено комплексное исследование острова Ван-Ай, расположенного к западу от острова Тайвань, включающее в себя расчет энергии, которая может быть получена за счет ветра, солнца, волн и биомассы, решение проблемы непостоянства выработки энергии.

Канарские острова также сильно зависят от экспорта нефтепродуктов, за счет которых вырабатывается до 99% потребляемой на островах энергии. В [4] предложена модель, благодаря которой Канарские острова к 2050 году полностью перейдут на систему энергообеспечения, базирующуюся только на альтернативных источниках энергии.

В России также существуют удаленные территории, которые зависят от поставок топлива с материка. Примером являются Соловецкие острова, находящиеся в Арктической зоне Российской Федерации, где нагрузка на производство тепловой энергии имеет большое значение в виду суровых климатических условий. Это группа островов, находящаяся в северной части Онежского залива Белого моря. На одном из островов архипелага находится поселок Соловецкий, население которого составляет 898 человек. Производство тепловой и электрической энергии происходит на двух дизельных электростанциях (ТЭС и ДЭС), оснащенных дизель-генераторными установками и водогрейными котлами. Соответственно, основным видом топлива является дизельное топливо, а также отработанное масло дизелей. Дизельное топливо завозится на архипелаг 2 раза в год во время летней и осенней морской навигации.

Целью данной работы является анализ действующей системы энергообеспечения Соловецких островов с расчетом нагрузок на производство электрической и тепловой энергий, расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от дизель-генераторных установок и водогрейных котлов.

**Материалы и методы исследования.** Проведение энергетического обследования текущей системы энергообеспечения поселка Соловецкий проводилось авторами путем выезда в пос. Соловецкий, осмотра действующих ТЭС и ДЭС. Расчет электрических и тепловых нагрузок производился на основе данных вахтенных журналов энергоснабжающей организации поселка Соловецкий по потреблению дизельного топлива и установленных приборов учета.

Расчет выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ от котлов водогрейных «Квант» КВа-2,0 был произведен с помощью методического пособия [5] Томского политехнического университета, используя данные, предоставленные ОАО «АрхОблЭнерго», по потребленному котлами дизельному топливу.

Для расчета выбросов загрязняющих веществ [5] от дизель-генераторных установок (ДГУ) вычислялся объем потребленного топлива по данным об электрических нагрузках, приведенных в рукописном журнале учета работы ДГУ.

**Результаты исследования.** В результате исследования были получены данные об электрических нагрузках. Средняя суточная мощность

в зимний период составляет 1440 кВт, в летний – 721 кВт. Годовой график нагрузок приведен на рис. 1. График демонстрирует снижение нагрузки в летний период практически в два раза по отношению к зимним максимумам, что связано с повышением температуры воздуха и увеличением продолжительности светового дня, но отчасти компенсируется ростом энергопотребления объектов туристического комплекса.

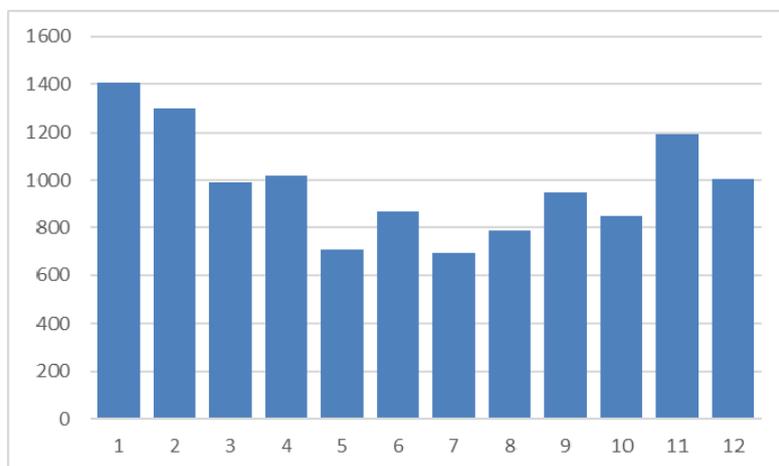


Рисунок 1 – Годовой график электрической нагрузки с шагом в 1 месяц за 2016 год, кВт

Определить фактическую выработку тепловой энергии котлами невозможно, так как установленные на ТЭС приборы учета тепловой энергии не функционируют. Поэтому произведенные расчеты и построенный график были сделаны на основе данных о потреблении дизельного топлива котлами. В настоящее время функционирует система утилизации тепла ДГУ, но не ведется учета произведенной тепловой энергии. Принимая, что система утилизации гарантированно покрывает 0,49 Гкал/ч получаем следующие данные по тепловым нагрузкам поселка, представленные на рис. 2.

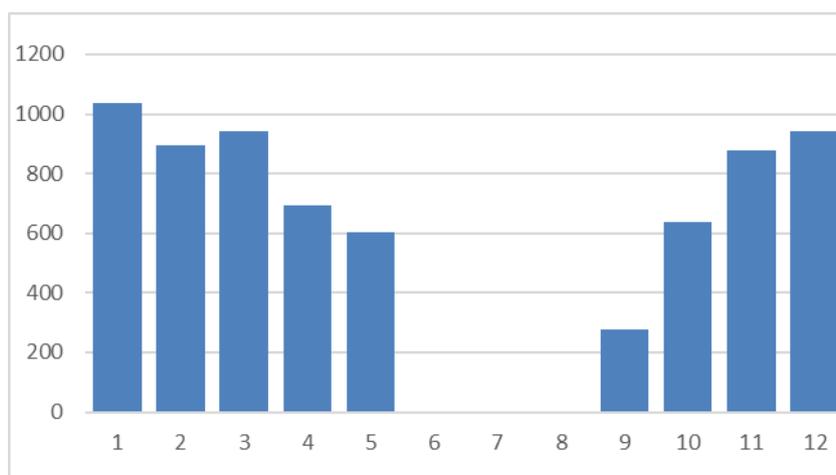


Рисунок 2 – Годовой график тепловой нагрузки, учитывающий утилизацию дымовых газов ДГУ, Гкал

На основании расчета выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ [5] от котлов водогрейных «Квант» КВа-2,0 был построен график, представленный на рис. 3. На графике представлено распределение по месяцам выбросов оксида углерода, оксидов азота в перерасчете на диоксид азота и оксидов серы в перерасчете на диоксид серы.

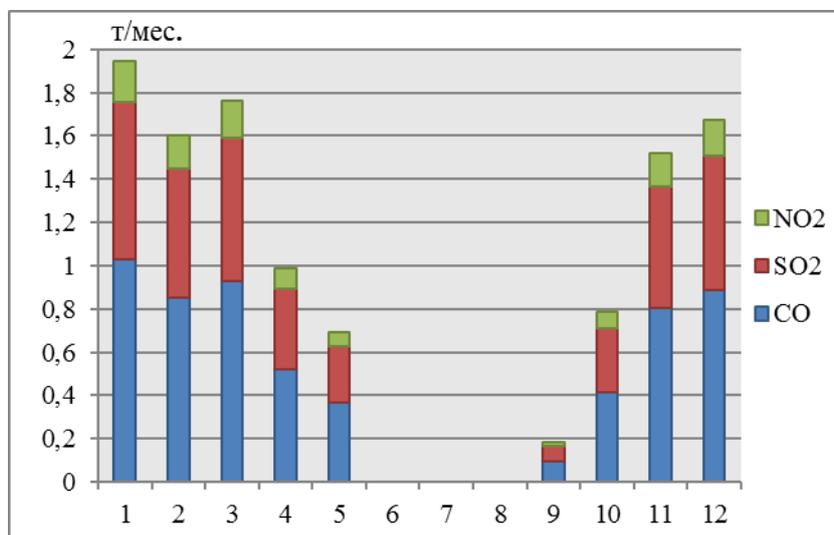


Рисунок 3 – Годовой график выбросов загрязняющих веществ от котлов водогрейных «Квант»

Результатом расчета выбросов загрязняющих веществ [5], производимых дизель-генераторными установками, является график, представленный на рис. 4.

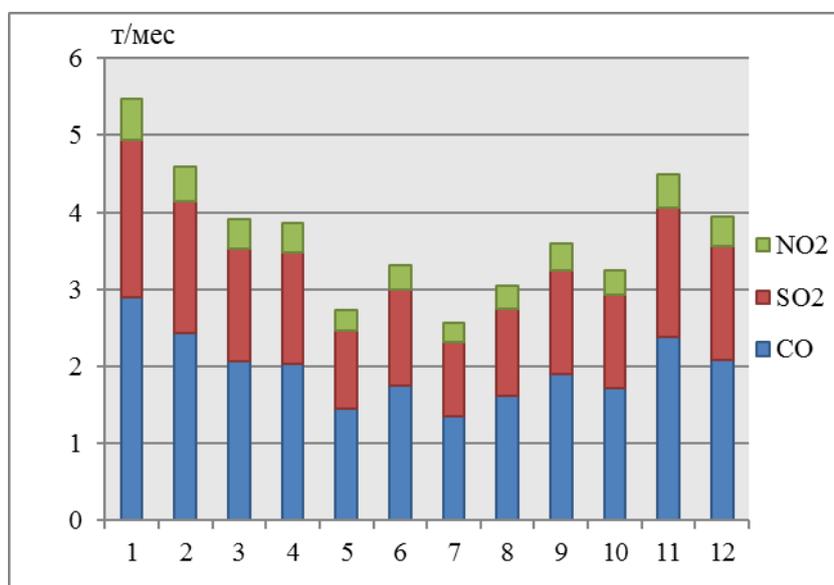


Рисунок 4 – Годовой график выбросов загрязняющих веществ от ДГУ

Суммарное годовое количество выбросов загрязняющих веществ (в тоннах) от водогрейных котлов и дизель-генераторных установок представлено на рис. 5.

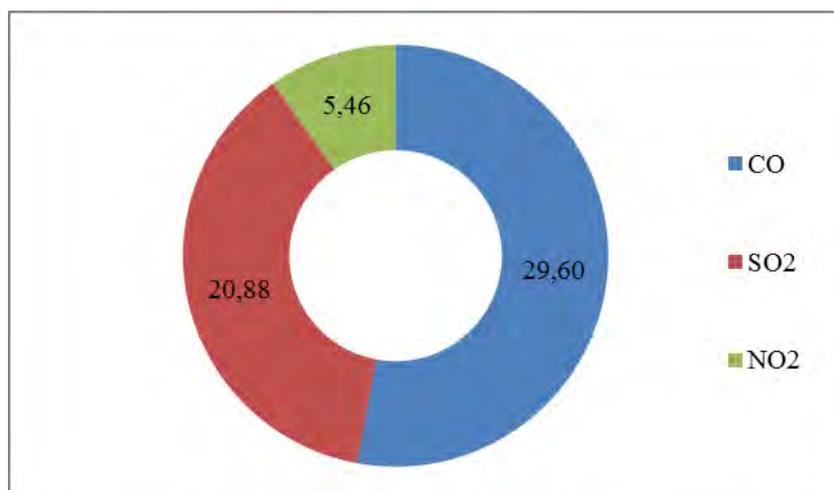


Рисунок 5 – Суммарное годовое количество выбросов загрязняющих веществ от водогрейных котлов и ДГУ, т/год

### Выводы

1. Проанализирована действующая система энергообеспечения Соловецких островов, рассчитаны нагрузки на производство электрической и тепловой энергии.

2. Удаленность от материка и сложные климатические условия затрудняют доставку дизельного топлива, за счет которого обеспечивается энергией поселок.

3. Вследствие суровых климатических условий увеличивается энергетическая нагрузка в зимний период времени.

4. Произведен расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от дизель-генераторных установок и водогрейных котлов.

5. Необходимо предпринимать меры по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

6. Соловецкие острова имеют большой потенциал к созданию независимой энергетической системы, основанной на использовании альтернативных источников энергии, что позволило бы сократить выбросы загрязняющих веществ.

7. Дальнейшие исследования будут направлены на углубленное изучение возможности внедрения альтернативных источников энергии и составления технико-экономического обоснования.

### Список использованных источников

1. Marín C, Alves LM, Zervos A., '100% RES-A challenge for island sustainable development. Instituto Superior Techico', <http://issuu.com/pubcipriano/docs/island100res/19>, (2005).

2. Cheng-Dar Yue, Chung-Sheng Chen, Yu-Chen Lee, 'Integration of optimal combinations of renewable energy sources into the energy supply of Wang-An Island', *Renewable Energy*, 86 (2016), 930-942.

3. Jiahong Liu, Chao Mei, Hao Wang, Weiwei Shao, Chenyao Xiang, 'Mutual adaptability of renewable energy and water-supply systems in islands', Energy Procedia, 105 (2017). – Pp. 799–804.

4. Hans Christian Gils, Sonja Simon, 'Carbon neutral archipelago – 100% renewable energy supply for the Canary Islands', Applied Energy, 188 (2017). – Pp. 342–355.

5. Расчет выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлоагрегатах котельных: Методическое пособие по выполнению практических занятий по курсу «Промышленная экология» для студентов специальности 320700 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / Сост. Л.И. Бондалетова, В.Т. Новиков, Н.А. Алексеев. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 39 с.

УДК 622.631.22

## **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ АВТОДОРОГ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА**

*А.М. Сафина*

*Санкт-Петербургский горный университет*

*e-mail: aza-safina@mail.ru*

**Аннотация.** *Угольные предприятия – источник комплексного негативного воздействия на окружающую среду. Угольная промышленность загрязняет атмосферный воздух, водные объекты, нарушает земли, является источником образования огромного количества отходов. За последнее десятилетие пылегазовые выбросы в атмосферу от предприятий угольной отрасли возросли более чем в два раза – с 233 тыс. т до 549 тыс. т.*

*Исследования, проведенные на базе бородинского разреза им. Щадова, показали, что наиболее остро проблема запыленности стоит на автодорогах, особенно в летний период работы. Взвешенная угольная пыль представляет опасность для здоровья рабочих, кроме того, отрицательно влияет на работу автомобилей.*

**Ключевые слова:** *уголь, угольный разрез, пылеобразование, пылеподавление, автодороги, удельный выброс пыли, концентрация пыли.*

Развитие угольной промышленности отрицательно сказывается на окружающей среде, кроме этого угольные разрезы являются источником образования огромного количества отходов.

Ежегодно на разрезах перемещается в отвалы 300-350 млн. т. горных пород. Удельный выброс загрязняющих веществ предприятиями по добыче топливно-энергетических полезных ископаемых в 2009 году составил около 5 кг на тонну угля.

За последнее десятилетие пылегазовые выбросы в атмосферу от предприятий угольной отрасли возросли более чем в два раза – с 233 тыс. т до 549 тыс. т. Вследствие выветривания горных пород, а также пылеобразования и пылевыделения в воздух попадает большой спектр загрязняю-

щих веществ, перенос на большое расстояние делает характер загрязнений трансграничным. При этом значительное количество выбросов пыли происходит от процессов добычи, складирования, бурения, взрывания и транспортировки угля.

Особенности отработки разрезов оказывают существенное влияние на специфику строительства и эксплуатации технологических автодорог. Карьерные дороги отличаются от магистральных и автодорог других промышленных предприятий небольшим сроком службы и протяженностью, высокими удельными нагрузками и частым изменением трассы. Кроме этого, отличительной особенностью является большая грузонапряженность и интенсивность движения.

Пылеобразование на автодорогах происходит вследствие высыпания из кузова породы, угля или руды, внесения пыли колесами автомашин, заноса ветром с прилегающих территорий, износа покрытия и шин. На интенсивность пылевыведения на автодорогах влияют в основном физико-механические свойства материала покрытия, скорость движения, масса и тип автомобиля, размеры дороги и метеорологические условия.

Результаты исследований показывают, что запыленность воздуха вблизи автодорог составляет  $0,5\text{--}103\text{ кг/м}^3$ , интенсивность выделения пыли на дорогах –  $0,014\text{ кг/с}$ . Дисперсность витающей пыли чрезвычайно высокая: 90-98% пылинок имеют размер менее 10 мкм. И являются потенциально пневмокониозоопасными из-за содержания свободного кремнезема в виде кварца, количество которого достигает до 40–42%. Такая пыль находится в зоне дыхания как штатного рабочего персонала, так и представителей ИТР разреза. Причем для работников разреза не предусматривается выдача средств защиты органов дыхания, поскольку класс условий труда по пылевому фактору, согласно СОУТ, относится к допустимому.

Исследования, проведенные на базе Бородинского разреза им. Щадова, показали, что проблема запыленности на автодорогах стоит особенно остро в летний период работы. Взвешенная угольная пыль представляет опасность для здоровья рабочих, кроме того, отрицательно влияет на работу автомобилей.

Помимо интенсивного пылеобразования и пылевыведения от карьерных дорог, на разрезе имеется проблема, связанная с эффективным увлажнением и связыванием выделяющейся пыли.

На сегодняшний день орошение карьерных дорог производится одним автомобилем «БЕЛАЗ», объемом  $75\text{ м}^3$ , с представленной справа оросительной системой. А также в целях обеспыливания дорог имеются 2 пожарные автомашины типа «Урал» емкостью  $13\text{ м}^3$ . Оросительная система на этих типах автомобилей представлена приваренной собственноручно трубой с просверленными в ней отверстиями. Эффективность орошения водой в таких системах оставляет желать лучшего, поскольку за счет небольшого радиуса и низкого давления распыления, а также из-за быстрого высыхания дороги увлажняется низкий процент пыли. Кроме этого, полив-

ка автомобильной дороги водой связана со значительными затратами. При одинаковых затратах на топливо и, соответственно, оплату труда, в результате получаем невысокую степень орошения автодорог разреза. В период высоких температур, сухого воздуха необходимость орошения увеличивается, что приводит к увеличению затрат на увлажнение пыли.

Таким образом, по итогам исследований на разрезе с учетом проведенного анализа существующих мероприятий по пылеподавлению был сформирован ряд технологических предложений по улучшению аэротехногенной ситуации на автодорогах разреза:

- изменение конструктивных особенностей поливочных машин с целью увеличения эффективности распыления воды за счет введения форсуночного распыления;
- применение дополнительных вяжущих веществ для создания пылеподавляющего раствора, имеющего более долговременный характер действия: для дорог предлагается применение раствора карбоксиметилцеллюлозы или ее солей, а для уменьшения пылеобразования и предупреждения самовозгорания угля хлористого кальция;
- разработка систем автоматизированного распыления воды в зонах постоянных автодорог на основе прокладки системы полипропиленовых или резиновых трубопроводов и форсуночного распыления в летний период;
- применение поваренной соли, как реагента, предупреждающего смерзание воды внутри бака поливочных машин в зимний период.

#### **Список использованных источников**

1. Зиновьев А.П., Купин А.Н., Ольков П.Л., Максимов Г.Г. Борьба с пылеобразованием на карьерных автодорогах нефтяными вяжущими. – Уфа: Башкирское книжное изд. – 1990. – 95 с.
2. Купин А.И., Назарова Н.Ю., Токмаков М.А. Применение Универсина-Л для обеспыливания автодорог с песчаноглинистым покрытием // Безопасное ведение работ и рекультивация нарушенных земель на разрезах. – Киев: Укр НИИпроект, – 1978. – С. 9 – 14.
3. Першин М.Н., Черкасов И.И., Платонов А.П. и др. Обеспыливание автомобильных дорог и аэродромов. – М.: Транспорт. – 1973. – 148 с.
4. Розов Ю.П., Белоусов Т.А., Крылов В.Д. и др. Рекомендации по применению лигносульфонатов для обеспыливания гравийных покрытий. – М.: ЦБНТИ Минавтодор. РСФСР. – 1980. – 40 с.
5. Резванцев В. И., Харченко В.А. Исследование смесей из Липецкого гранулированного шлака, обработанного битумной эмульсией// Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Развитие дорожного строительства с использованием укрепленных материалов». – М.: СоюздорНИИ, 1969. – С. 39-43.
6. Пособие по приготовлению и применению битумных дорожных эмульсий (к СНиП 3.06.03-85). – М.: СоюздорНИИ, – 1989. – 57 с.

7. Никитин В.С. Проветривание карьеров / В.С. Никитин, Н.З. Битлов. – М.: Недра, 1975. – 98 с.

8. Филатов С.С. Вентиляция карьеров. – М: Недра, 1981. – 257с.

УДК 622

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЕТРОГЕНЕРАТОРОМ

*В.Л. Червинский, А.М. Шимель*

*Белорусский национальный технический университет*

Моделирование процессов совместной работы накопителей и источников распределенной генерации представляет научный интерес с точки зрения оптимизации, как емкости накопителей, так и режимов их работы. В настоящее время автономные энергосистемы пока не получили широкого распространения в Республике Беларусь. Однако, в связи с ростом тарифов на электрическую и тепловую энергию и возросшими трудностями, связанными с подключением к энергосистеме источников распределенной генерации, интерес к автономным энергосистемам растет.

Для моделирования системы «ветрогенератор – накопитель» была создана физическая модель, состоящая из ветрогенератора на постоянных магнитах и накопителя на основе кислотного аккумулятора емкостью 100 А\*ч. При этом ветрогенератор вращался принудительно при помощи электрической дрели с регулируемой скоростью вращения. Целью физического моделирования системы «ветрогенератор – накопитель» было изучение изменения зарядной мощности для накопителя при изменении оборотов вращения ветрогенератора, а также изучение изменения потребляемой мощности ветрогенератором так же при изменении числа его оборотов, как на холостом ходу, так и под нагрузкой.

Ветрогенератор самодельной конструкции представляет собой синхронный трехфазный генератор на постоянных магнитах с двумя секциями статоров и одним ротором. На каждой секции статора располагается 9 обмоток по 100 витков в каждой, намотанных медным проводом сечением 0,75 мм<sup>2</sup>. Внешний вид генератора показан на рис. 1.



Рисунок 1 – Внешний вид ветрогенератора

Переменный трехфазный ток выпрямляется диодными сборками с шестью диодами в каждой.

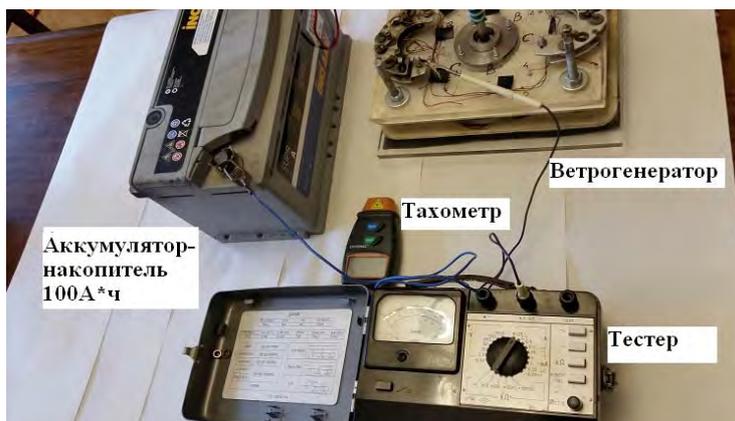


Рисунок 2 – Взаимное расположение приборов при исследовании

На каждую секцию статора работает одна диодная сборка.

Для проведения исследований была собрана следующая схема, показанная на рис. 2. Обороты ротора ветрогенератора измерялись цифровым лазерным тахометром марки DT-2234C+. Потребляемый ток измерялся тестером марки Ц4340. Потребляемая мощность находилась по формуле:

$$P=U*I,$$

где  $U$  – напряжение в В,  $I$  – ток в А.

При проведении исследований были получены данные, на основании которых был построен совмещенный график, показанный на рис.3.

Здесь по вертикальной оси отмечена мощность в Вт, а по горизонтальной – обороты ветроколеса в об/мин.

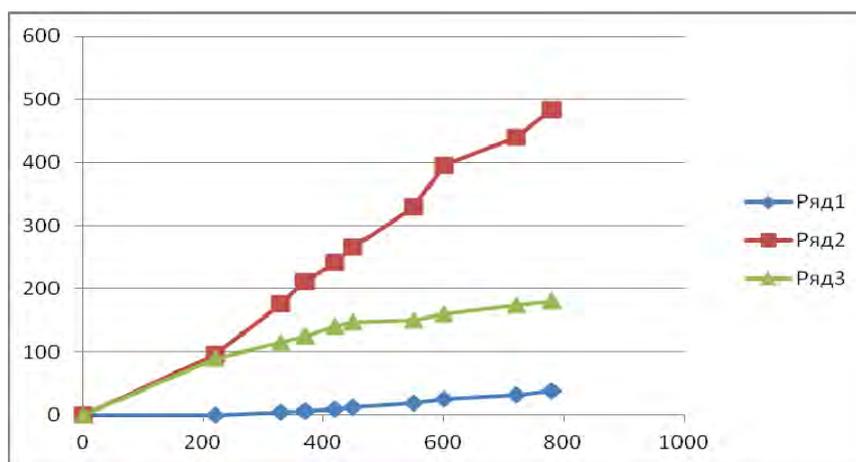


Рисунок 3 – Графики изменения мощности от оборотов ротора ветрогенератора: Ряд1 (синий) – Зарядная мощность (Вт); Ряд2 (красный) – Мощность, потребляемая дрелью при работе ветрогенератора под нагрузкой (Вт); Ряд3 (зеленый) – Мощность, потребляемая дрелью при холостом ходу ветрогенератора (Вт)

Из графика видно, что зарядный ток растет не сразу с началом вращения ветроколеса, а начиная примерно с 200 об/мин. Для таких оборотов требуется механическая мощность порядка 100 Вт. Далее с ростом числа оборотов соответственно возрастает как потребляемая ветрогенератором мощность –  $P_{\text{потр}}$ , так и зарядная мощность –  $P_{\text{заряд}}$ . Соотношение этих мощностей определяет к.п.д. ветрогенератора:

$$\eta = P_{\text{заряд}}/P_{\text{потр}}$$

При работе ветрогенераторов необходимо учитывать их особенности, такие как:

– для обеспечения максимального к.п.д. ветроколеса следует изменять частоту его вращения в зависимости от скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности  $Z$ , который равен отношению скорости конца лопасти к скорости ветра (рис. 4):

$$Z = V_{\text{л}}/V;$$

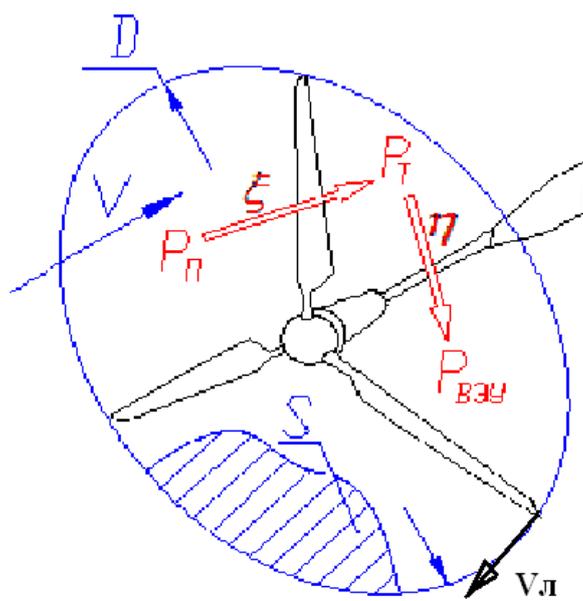


Рисунок 4 – Основные параметры ветроэнергоустановки (ВЭУ)

– для зарядки накопителя необходима скорость вращения ветроколеса, превышающее некоторое минимальное значение, при котором напряжение на ветрогенераторе превышает номинальное напряжение на аккумуляторе-накопителе. В нашем случае – это 200 об/мин;

– гораздо эффективнее управлять скоростью вращения ветроколеса путем изменения величины шунтирующей нагрузки, чем применением механических систем. В нашем случае возможно подключение замыкающих контактов реле к выводам «+» и «-» диодной сборки, что полностью остановит ветроколесо. Возможно подключение шунтирующих емкостей на трехфазную обмотку статора, как это показано на рис. 5.

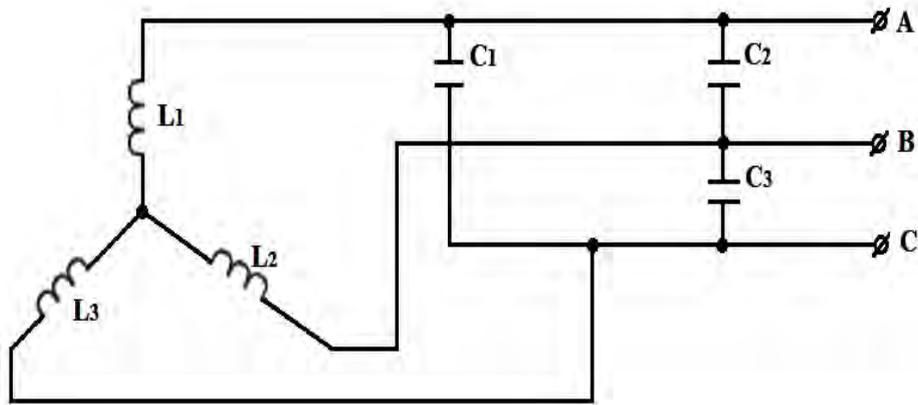


Рисунок 5 – Вариант подключения шунтирующих емкостей для автоматического управления скоростью вращения ветроколеса

Можно выделить следующую особенность работы ветрогенератора в составе с нагрузкой: с целью снижения емкости аккумуляторов-накопителей необходимо применять совмещение различных источников энергии, таких как солнечная, ветровая, дизель-генераторная и т.д. Преимущества гибридной генерации – это, в первую очередь меньшая необходимость в накопителях энергии. Управление гибридной системой основано на поддержании энергобаланса:

$$P_{\text{нагр}} = P_{\text{ветр}} + P_{\text{солнечн}} + P_{\text{накопит}} * - P_{\text{потери}}.$$

\*здесь, в общем случае,  $P_{\text{накопит}}$  может служить как источником энергии для потребителя, так и нагрузкой для генераторов. Схема управления гибридной системой с общей шиной низкого напряжения 12В представлена на рис. 6.

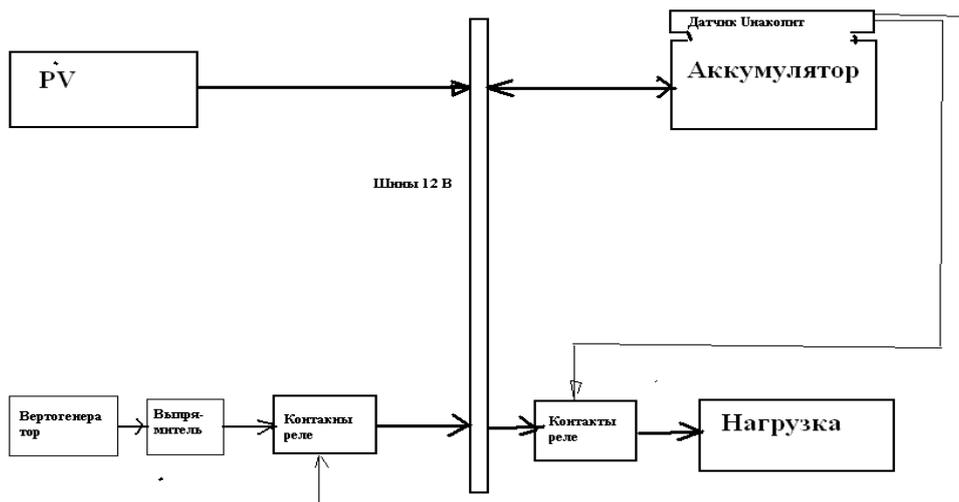


Рисунок 6 – Схема управления гибридной системой с общей шиной низкого напряжения 12 В

Здесь для управления системой можно задаться контрольным параметром – величиной напряжения на клеммах аккумулятора-накопителя  $U_{\text{накопит}}$ , которая определяет степень его зарядки.

При этом за основной генератор можно взять солнечную панель, тогда дополнительный (ветровой или дизель-генераторный) будет подключаться в зависимости от величины  $U_{\text{накопит}}$ . При снижении  $U_{\text{накопит}}$  ниже определенного порогового значения, что представляет для системы аварийный режим, датчик напряжения дает сигнал на отключение нагрузки.

**Выводы.** В результате физического моделирования системы созданной системы «ветрогенератор-накопитель» получены графики соотношения потребляемой ветрогенератором мощности на разных оборотах, как на холостом ходу, так и под нагрузкой, которой являлся накопитель. Из графиков видно, что зарядная мощность растет не сразу с началом раскрутки ветрогенератора, а начиная с 200 об/мин. Соотношение потребляемой и зарядной мощности определяют к.п.д. ветрогенератора. Преимущество гибридной генерации состоит в меньшей потребности в накопителях энергии. Физическое моделирование определило подходы к управлению автономной гибридной генераторной системой, состоящей из фотоэлектрической системы и ветрогенератора, работающей на шины низкого напряжения, а именно: управление заключается в первоочередной работе фотоэлектрической системы и вторичном подключении ветрогенератора. Сигналом такого переключения должна служить величина напряжения на аккумуляторе-накопителе.

УДК 662.8.05

## ПОИСК СПОСОБОВ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ ТЭС НА ПРИМЕРЕ СЛАНЦЕЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ

*М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова*  
*Санкт-Петербургский горный университет*

*E-mail: max.nazarenko@mail.ru, natalia.kondrasheva@mail.ru,*  
*ssn\_58@mail.ru*

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются важные проблемы использования твердого низкосортного углеводородного сырья для тепловых электростанций, а именно снижение отрицательного воздействия при их переработке на окружающую среду и разработка комплексных и рациональных технологий их переработки.

**Ключевые слова:** зольные отходы, теплоэлектростанции, утилизация отходов, рациональное природопользование, горючие сланцы.

В настоящее время происходит постоянный рост энергопотребления уменьшение известных запасов легкой нефти, увеличение сернистости и обводненности нефти. В результате чего, большинство стран стремятся диверсифицировать структуру своей энергетики, развивать местные низкосортные виды топлива, например, бурые угли или горючие сланцы [1-7]. Глав-

ной проблемой переработки такого вида сырья, например, бурых углей и горючих сланцев, является образование большого количества зольных отходов, для хранения которых необходимо выделять огромные территории. Учитывая то, что на каждые 50 тыс. т. зольных отходов, складироваемых в отвалах, затрачивается 15-20 млн. рублей в год на экономические платежи, то положение с отходами становится не только экологической, но и экономической проблемой. Использование золы в строительной и сельскохозяйственной промышленности полностью не решает проблему образования большого количества данных отходов, так как большая часть продолжает складироваться в отвалах.

Поскольку Россия имеет большие по объему месторождения горючих сланцев: Прибалтийский (10246,7 млн. т.), Тимано-Печорский (4888 млн. т.), Вычегодский (58105,8 млн. т.), Волжский (25822,4 млн. т.), Оленекский (380000 млн. т.) и др. бассейны, по количеству которых ее опережают только США и Бразилия объектом исследования в данной работе была выбрана сланцевая зола и исходя из выше сказанного, цель данной работы – поиск способов утилизации сланцевой золы, при которых зола будет являться сырьевым объектом многоцелевого назначения.

Ранее в работах [7-9], были изучены составы сланцевой золы, результаты показали экспериментальных исследований по определению химического состава золы показали, что почти все элементы сланцевой золы присутствуют в виде оксидов:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ . В небольшом количестве присутствуют также такие элементы, как Pb (316,9 ppm), Cr (420,3 ppm), Ni (511,9 ppm), Cu (271,6 ppm), Zn (407,7 ppm), Zr (596,0 ppm). Проанализировав полученный химический состав сланцевой золы, сделан вывод, что благодаря большому содержанию следующих оксидов:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др. сланцевую золу можно использовать в качестве природных минеральных сорбентов для очистки воды от органических загрязнителей (нефти и нефтепродуктов) и в качестве флюсующей добавки для получения таких металлов, как медь, никель и кобальт в металлургии.

В работе [10] описано использование сланцевой золы в качестве природного сорбционного материала для очистки воды от органических загрязнителей (нефти и нефтепродуктов). В таблице 1 показаны полученные значения сорбционной емкости сланцевой золы по отношению к различным загрязнителям с различной плотностью и вязкостью. Полученные данные говорят о высокой эффективности использования зольного материала для очистки воды от органических загрязнителей.

Сорбционная емкость различных материалов, мл/см<sup>3</sup>

Материал	Природный сорбент, фракция 1-2 мм			
	Песок	Цеолит	Горючие сланцы	Сланцевая зола
Сырая легкая нефть	0,39-0,48	0,52-0,79	0,67-0,74	1,07-1,23
Тяжелая высоковязкая нефть	0,78-0,85	0,86-0,94	0,86-0,94	1,89-2,01
Тяжелый газойль КК	0,70-0,78	0,85-0,99	0,87-0,93	1,76-1,99
Легкий газойль КК	0,32-0,40	0,64-0,82	0,64-0,74	1,52- 1,61
Дизельное топливо	0,37-0,42	0,47-0,51	0,53-0,69	1,06-1,16

Флюсующие материалы (флюсы) – это материалы, взаимодействующие в обжиге с глинистыми минералами с образованием более легкоплавких соединений. Поэтому введение в состав массы флюсующих материалов улучшает степень спекания и снижает температуру обжига. В качестве флюсующих материалов используются различные вещества, например, полевые шпаты. Они бывают следующего вида: калиевый полевой шпат (ортоклаз) –  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , натриевый полевой шпат (альбит) –  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , известковый полевой шпат (анортит) –  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . Использование доломита ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ) и талька ( $4SiO \cdot 3MgO \cdot H_2O$ ) также оказывает положительное влияние на процесс плавки, так, например, добавка талька в фаянсовую массу предотвращает образование трещин в глазурном слое – «пека» – и повышает термостойкость.

В работе [10] дана оценка использования сланцевой золы в качестве флюсующей добавки для получения меди, кобальта и никеля из оксидных и сульфидных соединений. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что за счет оксидов кальция, кремния, алюминия и железа в сланцевой золе, понижается температура процесса получения металлов и как следствие снижаются расходы на электроэнергию. В сланцевой золе уже содержатся флюсующие материалы, за счет чего достигается экономия средств идущих, на приобретение флюсующих добавок.

Основное преимущество использования зольных отходов переработки горючих сланцев в рассматриваемых процессах очистки воды от органических загрязнений или в качестве флюсов в металлургической промышленности, является то, что зола не требует дополнительных затрат на ее изготовление, так как она уже является отходом переработки и ее использование в качестве сырьевого материала позволит повысить эффективность использования низкосортных видов углеводородов для получения электроэнергии.

### Список использованных источников

1. Рудина М.Г., Серебрянникова Н.Д., Справочник сланцепереработчика. – Л.: Химия, 1988. – 256 с.
2. Стрижакова Ю.А, Усова Т.В., Третьяков В.Ф. Горючие сланцы – потенциальный источник сырья для топливно-энергетической и химической промышленности // «Вестник МИТХТ», Химия и технология органических веществ, 2006. – №4. – С. 76-85.
3. Leimbi-Merike R., Tiina H., Eneli L., Rein K. Composition and properties of oil shale ash concrete. Oil shale, 2014. – Vol. 31. – №2. – Pp. 147-160.
4. Bityukova L., Motler R. Composition of oil shale ashes from pulverized firing and circulating fluidized-bed boiler in Narva thermal power plants. Oil shale, 2010. – Vol. 27. – №4. – Pp. 339-353.
5. Игоева Т.Е., Каминский Ю.Д. Кызылский золоотвал как источник неблагоприятного воздействия на окружающую среду // Сибирский экономический журнал, №6, 2010. – С. 885-892.
6. Юдович Я.Э. Горючие сланцы Республики Коми. Проблемы освоения. – Сыктывкар: Геопринт, 2013. – 90 с.
7. Назаренко М.Ю., Бажин В.Ю., Салтыкова С.Н., Коновалов Г.В. Изучение физико-химических свойств горючих сланцев // Кокс и Химия, 2014. – №3. – С. 44-49.
8. Назаренко М.Ю., Бажин В.Ю., Салтыкова С.Н., Шариков Ф.Ю. Изменение состава и свойств горючих сланцев во время термической обработки // Кокс и Химия, 2014. – №10. – С. 46-49.
9. Назаренко М.Ю., Кондрашева Н.К., Салтыкова С.Н. Перспективы добычи и комплексного использования горючих сланцев России // Горный журнал, 2016. – №2. – С. 36-38.
10. Назаренко М.Ю., Кондрашева Н.К., Салтыкова С.Н. Эффективность применения горючих сланцев и сланцезольных отходов для очистки воды от органических загрязнителей // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2016. – Т. 327. – №9.

УДК 628.543.1

### ОБРАБОТКА ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД НА СООРУЖЕНИЯХ С НИЗКИМИ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЗАТРАТАМИ

*В.Э. Блажук, В.Н. Ануфриев, О.И. Родькин*

*Белорусский национальный технический университет*

В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется более 200 сооружений биологической очистки городских сточных вод различной производительности, а их суммарная мощность в ближайшей перспективе будет только возрастать. Одной из наиболее сложных проблем, связанных с функционированием очистных сооружений, является управление образующимися осадками, которые являются одним из видов крупнотоннажных отходов. Ежегодно в Республике Беларусь образуется более 50 тыс.

тонн осадков сточных вод в пересчете на сухое вещество, т.е. без учета влажности. Соответственно масса и объемы образующегося влажного осадка намного выше и в среднем составляют около 0,7 млн. тонн в год. Таким образом, осадки сточных вод являются одним из наиболее распространенных отходов, объем которых продолжает увеличиваться.

В настоящее время осадки складываются или непосредственно на очистных сооружениях или на специально выделенных площадках, которые являются источником долгосрочного воздействия на почву и верхние горизонты подземных вод, главным образом связанного с загрязнением сопредельных сред биогенными элементами и тяжёлыми металлами. Многие предприятия водопроводно-канализационного хозяйства в настоящее время имеют проблемы с получением новых площадок для размещения осадков сточных вод, в тех случаях, когда емкость имеющихся иловых прудов исчерпана.

Размещение и долговременное хранение осадка на иловых площадках для Республики Беларусь весьма распространенным способом утилизации даже для крупных очистных сооружений. При этом действующие ТНПА (ТКП 45-4.01-202-2010) ограничивают область применения иловых площадок производительностью очистных сооружений не более 25000 м<sup>3</sup>/сут. Для очистных сооружений большей производительностью должны применяться сооружения механического обезвоживания осадка. Как известно, основным направлением при обработке осадка является максимальное уменьшение его объёма за счет уменьшения его влажности. Так при снижении влажности осадка с 99,4% (избыточный ил из вторичных отстойников) до 65% (осадок после механического обезвоживания или выдерживания 10-15 лет на иловых площадках) объем осадка уменьшается в 10 раз. Дальнейшее снижение влажности до 10% может достигаться сушкой. Максимально возможное сокращение объема осадка может быть получено при его сжигании с получением золы как конечного продукта. При этом стоимость обработки осадка в случае применения высокотехнологичных методов обработки осадка, которые позволяют снизить влажность и соответственно объем обрабатываемого осадка характеризуются резким ростом в сравнении экстенсивными методами (обезвоживание на иловых площадках). Так, например, стоимость капитальных вложений на сооружения механического обезвоживания с использованием ленточных фильтр-прессов варьируются в пределах 80–250 тысяч Евро в зависимости от производительности оборудования. Данное оборудование характеризуется энергопотреблением около 20–30 кВт ч на 1 т сухого вещества осадка. При этом требуется 4–12 кг специального реагента флокулянта на 1 т сухого вещества осадка. Применение методов дополнительной обработки, такой как сушка и сжигание делают процесс обращения с осадком еще более затратным. При сжигании стоимость инвестиций уже достигает уровня 20-40 миллионов Евро. И если для крупных очистных сооружений такие технологии являются приемлемыми из-за большого объема обрабатываемого осадка, то для очистных сооружений небольшой

и средней производительности проблема обработки осадка является актуальной в части технических решений, которые при соответствующем уровне санитарной и экологической безопасности характеризовались бы приемлемыми технико-экономическими показателями.

В этом плане представляет определенный интерес замена иловых площадок традиционных конструкций на грунтово-растительные площадки предназначенных для обработки осадков.

Простота устройства грунтово-растительных площадок определяет их эффективность для очистки сточных вод небольших населенных пунктов и к настоящему времени в Республике Беларусь построен ряд сооружений такого типа. В ТНПА Республики Беларусь внесены положения регламентирующие основные правила проектирования таких сооружений.

Грунтово-растительные площадки предназначенных для обработки осадков имеют определенные особенности и требуют проведения специальных исследований по адаптации технических решений к климатическим условиям Республики Беларусь и разработке усовершенствованных конструкций таких сооружений.

Типичная конструкция сооружения приведена на рис. 1.

На площадки осадок подается на поверхность площадки по распределительной системе трубопроводов. В слое загрузки с растениями происходит обезвоживание осадка за счет транспирации, испарения и его частичная минерализация. Профильтрованная вода собирается дренажными трубопроводами, уложенными в нижней части загрузки и отводится обратно на очистные сооружения.

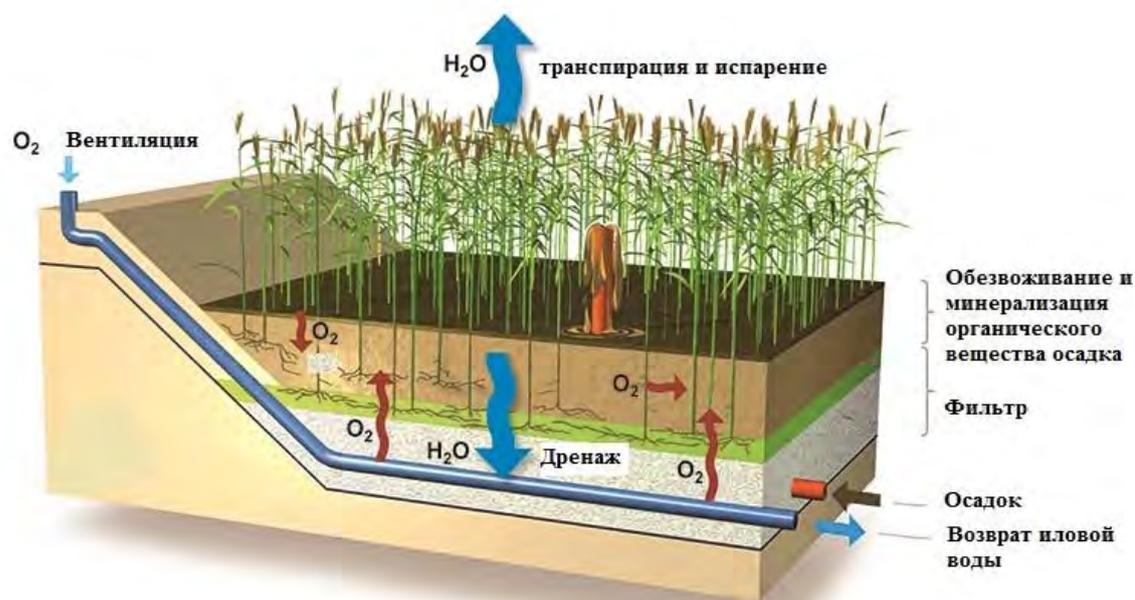


Рисунок 1 – Схема иловой грунтово-растительные площадки

Для предотвращения просачивания иловой вод в нижележащие слои грунта фильтрующая загрузка размещается над слоем гидроизоляции из полимерной пленки таким образом в отличие от традиционных иловых площадок отсутствует фильтрация в грунт иловой воды, профильтровавшейся через загрузку.

Отдельным перспективным направлением является использование на иловых грунтово-растительных площадках вместо макрофитов (камыш, тростник и т.д.) быстрорастущих древесных культур, например, ивы. Такой подход позволяет использовать органические вещества осадка сточных вод как ресурс для получения биотоплива. Урожайность при возделывании быстрорастущей ивы в Беларуси составила от 7 до 12 тонн сухой древесины в год на разных видах грунтов [2]. Таким образом, рассматриваемое предложение может позволить получить техническое решение обеспечивающее утилизацию осадка сточных вод с низкими затратами и минимальным энергопотреблением которое позволяет дополнительно получить энергоресурс в виде древесного биотоплива.

#### **Список использованных источников**

1. Sludge Treatment Reed Beds. Электронный ресурс <http://waterandcarbon.com.au/technology/sludge-treatment-reed-beds/> дата доступа 15.10.17.

2. Родькин О.И. Производство возобновляемого топлива в аграрных ландшафтах: экологические и технологические аспекты: монография/ Родькин О.И. – Мн.: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. – 212 с.

УДК 622.418

### **РАЙОНИРОВАНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ РОССИИ ПО ЗАТРАТАМ НА РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В РУДНИКЕ**

*Д.В. Николаева, А.А. Наумов*

*Санкт-Петербургский Горный университет*

*e-mail: nikolaeva.dasha@inbox.ru*

**Аннотация.** *Разработан критерий оценки энергопотребления систем кондиционирования рудничного воздуха, который позволяет обоснованно проводить выбор способов и средств снижения энергетических и экономических затрат на регулирование теплового режима. Проведено районирование основных горнодобывающих регионов России по полученному критерию. В целом, результаты исследования позволяют выбирать регионы, где экономия энергетических ресурсов путем разработки и внедрения новых способов и средств регулирования теплового режима является наиболее актуальным и перспективным, как в технологическом, так и в экономическом плане.*

**Ключевые слова:** *тепловой режим, кондиционирование воздуха, критерий, энергопотребление, шахты, рудники, районирование.*

Большая часть горнодобывающих предприятий России находятся в субарктическом поясе, в области континентального и резко-континентального климата, что обуславливает дополнительное потребление энергии на регулирование теплового режима, которое зависит от длительности холодного периода года, когда температура воздуха ниже +2 °С.

Вопросами регулирования теплового режима шахт и рудников Севера занимались многие ученые горные-теплофизики: Дядькин Ю.Д., Чабан П.Д., Зимбельборд А.Ф., Шерстов В.А., Шувалов Ю.В., Казаков Б.П., Галкин А.Ф., и др. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Ими обоснованы и разработаны различные способы и средства для регулирования теплового режима шахт и рудников. Можно констатировать, что накоплен достаточный научный и инженерный потенциал по проектированию и внедрению энергетически и экономически эффективных способов регулирования теплового режима шахт и рудников. Однако в настоящий период, применение подобных систем, не носит обязательного характера и скорее является исключением, чем правилом.

Целью данной работы является определение горнодобывающих регионов, для которых использование оптимальных режимов регулирования теплового режима шахт и рудников, с использованием «безэнергетических» систем наиболее актуально.

По результатам проведенных расчетов было проведено районирование горнодобывающих регионов России по разработанному критерию оценки энергопотребления.

Сделан вывод, в каких регионах Российской Федерации применение «безэнергетических» систем при регулировании теплового режима наиболее актуально.

#### **Список использованных источников**

1. Дядькин Ю.Д. и др. Тепловой режим рудных, угольных и россыпных шахт Севера. / Ю.Д. Дядькин, А.Ф. Зильберборд, П.Д. Чабан. М.: Изд-во «Наука», 1968. – 172 с.

2. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Тимофеевский Ю.С. Горная теплофизика. Регулирование теплового режима шахт и рудников. Л.: Изд. ЛГИ, 1976. – 159 с.

3. Казаков Б.П. Ресурсосберегающие технологии управления климатическими параметрами рудников: На примере калийных рудников. Дис. д-ра техн. наук: – Пермь, 2001. – 315 с.

4. Осодоев М.Т., Шерстов В.А. К экономической оценке эффективности регулирования теплового режима шахт Севера / Исследования по физико-техническим проблемам Севера. – Якутск, 1974. – С. 11-14.

5. Галкин А.Ф. Тепловой режим подземных сооружений Севера. – Новосибирск: ВО Наука, 2000. – 305 с.

6. Галкин А.Ф. Горнотехнические системы регулирования теплового режима // Горная промышленность. – № 3, 2008. – С.14-17.

7. Галкин А.Ф., Хохолов Ю.А. Теплоаккумулирующие выработки. – Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1992. – 133 с.

8. Гудыма Н.Б., Галкин А.Ф. Определение риска производственно-обусловленных простудных заболеваний горнорабочих. – Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт военно-технического образования и безопасности СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С 73-75.

9. Горбунов Н.И. Теория и практика аэрологии горных предприятий / Учеб. пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2003. – 116 с.

10. Петрачкова Н.М., Хорхордина Е.М., Галкин А.Ф. Анализ средств индивидуальной защиты органов дыхания для работы в зимних условиях. – Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт военно-технического образования и безопасности СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С 99-102.

11. Строительный нормы и правила: СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М., 2003.

12. Строительный нормы и правила: СанПиН – 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М., 1996.

УДК 541

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО И КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА НЕФТЯНЫХ ФРАКЦИЙ С ТЕМПЕРАТУРОЙ КИПЕНИЯ 40-140<sup>0</sup>С В ВОДЕ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОЙ МИКРОЭКСТРАКЦИИ (SPME)**

*А.С. Панасюгин, А.И. Теран, В.Н. Ануфриев, С.В. Григорьев, Т.В. Силина  
Белорусский национальный технический университет*

***Аннотация.** В статье рассмотрен метод определения количественного и качественного состава нефтяных фракций с температурой кипения 40-160<sup>0</sup>С в воде методом твердофазной микроэкстракции. Принцип метода основан на сорбции анализируемого компонента из водных объектов сорбционным материалом (полидиметилсилоксан). Далее при термодесорбции в испарителе газового хроматографа и анализируемый компонент определяли по стандартной процедуре с использованием пламенно-ионизационного детектора.*

*В результате ряда измерений в работе показана принципиальная возможность использования рассматриваемого метода для определения нефтепродуктов различного состава в водных средах.*

***Ключевые слова:** нефтяное загрязнение, нефтепродукты, газовая хроматография, твердофазная микроэкстракция.*

**Введение.** При эксплуатации объектов энергетики одной из распространенных проблем является сброс в водные объекты сточных вод, содержащих нефтепродукты. Кроме того, поступление в водные объект нефтепродуктов сопряжено с авариями и другими нештатными ситуациями на объектах энер-

гетики и транспорта. В этих случаях загрязнения носят делокализованный характер и могут распространяться на большие площади [1].

В настоящее время для определения нефтепродуктов в водах различного происхождения широко используют метод твердофазной микроэкстракции (Solid Phase Microextraction – SPME) [1-2]. Отличительной чертой этого метода является совмещение в одном устройстве системы пробоотбора и ввода пробы в хроматограф [2]. Проведенные эксперименты показали, что метод твердофазной микроэкстракции лишен ряда недостатков, присущих существующим методикам. Это метод пробоподготовки в котором исключено использование органических растворителей в качестве экстрагентов. Он также характеризуется простотой и экспрессностью, особенно при анализе водных матриц.

Рассматриваемый метод также удовлетворяет требованию к методикам контроля нефтепродуктов в воде СанПиН 10-124 РБ 99, согласно которому в случае превышения ПДК необходимо определять не только количественный, но и качественный состав нефтепродуктов в воде.

В основе метода лежит использование микроколичества экстракционной фазы, как правило, менее 1 мкл. Экстракционной фазой может твердый сорбент, обладающий развитой пористой структурой для увеличения адсорбции.

Таким образом, метод измерения основан на количественном и качественном определении анализируемых компонентов методом газовой хроматографии с предварительным концентрированием пробы методом твердофазной микроэкстракции (SPME). Анализ проводится на колонке с неполярной неподвижной фазой.

Возможности метода твердофазной микроэкстракции иллюстрируются на примере определения нефтепродуктов в водных средах.

**Методика.** Выполнение измерений методом твердофазной микроэкстракции (SPME) осуществлялось на газожидкостных хроматографах серии «Цвет» и «Хромас», оснащенных пламенно-ионизационными детекторами с использованием двух колоночной схемы.

Хроматографическая колонка №1 для количественного определения: материал – стекло; длина 30 м; внутренний диаметр 0,6–0,65 мм; неподвижная фаза – полидиметилсилоксан (SE 30), эффективность колонки не менее 30000 тт. по толуолу при 170°C производства НП ОДО «Люкэп».

Хроматографическая колонка №2 для качественного определения: материал – стекло; длина 60 м; внутренний диаметр 0,4–0,45 мм; неподвижная фаза – полидиметилсилоксан (SE 30), эффективность колонки не менее 15000 тт. по толуолу при 170°C, производства НП ОДО «Люкэп».

На первой колонке определяли количество нефтепродуктов в пробе, при этом нижний предел обнаружения составлял 0,064 мг/л. При содержании нефтепродуктов выше 1,0 мг/л необходимо проводить качественное определение типа нефтепродукта, которое проводят на колонке 2.

Устройство для твердофазной микроэкстракции, снабженное экстракционной нитью, покрытой слоем полидиметилсилоксана толщиной

100 мкм, производства фирмы "Supelco". После экстракции нефтепродуктов из пробы устройство вводят в испаритель хроматографа, где происходит термодесорбция нефтепродукта.

Растворы с известным качественным и количественным составом нефтепродуктов в пробе готовили на основе водопроводной воды. В воду, химический состав которой приведен ниже, помещали расчетное количество смеси нефтепродуктов.

Химический состав воды: pH – 7,46; Na<sup>+</sup> – 7,38 мг/л; K<sup>+</sup> – 1,27 мг/л; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – 0,21 мг/л; Ca<sup>2+</sup> – 43,4 мг/л; Mg<sup>2+</sup> – 4,9 мг/л; Cl<sup>-</sup> – 29,11 мг/л; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 41,2 мг/л; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 2,03 мг/л; NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – менее 0,1 мг/л; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 167,0 мг/л; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – необн. Br<sup>-</sup> – 0,12 мг/л; F<sup>-</sup> – 0,1 мг/л; SiO<sub>2</sub> – 11,44 мг/л; общая жесткость 2,65 мг-экв/л; карбонатная жесткость 2,49 мг-экв/л.

В качестве модельной смеси нефтепродуктов использовали паспортизованные фракции фирмы FLUKA: петролейный эфир температура кипения 40-60 °С, лигроин температура кипения 60-100 °С, бензин температура кипения 65-100 °С, бензин температура кипения 80-110 °С, бензин температура кипения 100-140 °С. Классификация химической чистоты всех реактивов – ч.д.а.

Градуировочную характеристику, выражающую зависимость площадей хроматографических пиков определяемых нефтепродуктов от их содержания в градуировочной пробе устанавливали по 5 растворам различной концентрации. Их готовили из смеси нефтепродуктов, аликвоту, которых растворяли в ацетоне, далее разбавлением в воде достигали следующего содержания нефтепродуктов в пробе 0,053; 0,525; 1,05; 1,575; 2,625 мг/л, соответственно от 0,5 до 26 ПДК.

Каждую градуировочную пробу хроматографировали 5 раз, начиная с самой низкой концентрации определяемых компонентов. Условия проведения анализа и градуировки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия проведения анализа и градуировки

Показатель	Значение
Температура термостата колонки, °С	200
Температура испарителя, °С	270
Температура детектора, °С	250
Суммарный расход газа-носителя, см <sup>3</sup> /мин	35
Коэффициент деления потока на входе в колонку	1/5
Расход газов для ионизационно-пламенного детектора, см <sup>3</sup> /мин:	
водород	30
воздух	300

**Результаты и их обсуждение.** При определении количественного содержания нефтепродуктов в воде использовали метод абсолютной калибровки. Концентрацию нефтепродуктов в воде ( $C$ , мг/дм<sup>3</sup>) определяли по формуле (1). Для этого используют среднее арифметическое площадей пиков, полученных при обработке не менее 2 хроматограмм.

$$C_i = H_i / a, \quad (1)$$

где  $H_i$  – сумма площадей пиков;

$a$  – коэффициент регрессии, который определяли процессе градуировки.

За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов анализа двух параллельных проб.

Полученные хроматограммы показаны на рис. 1-2.

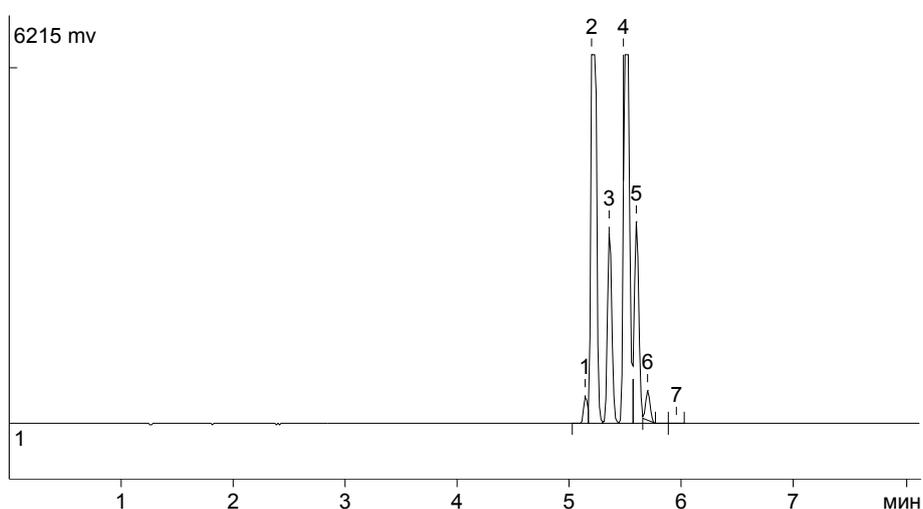


Рисунок 1 – Хроматограмма низкокипящих нефтепродуктов для смеси петroleйного эфира-лигроина.

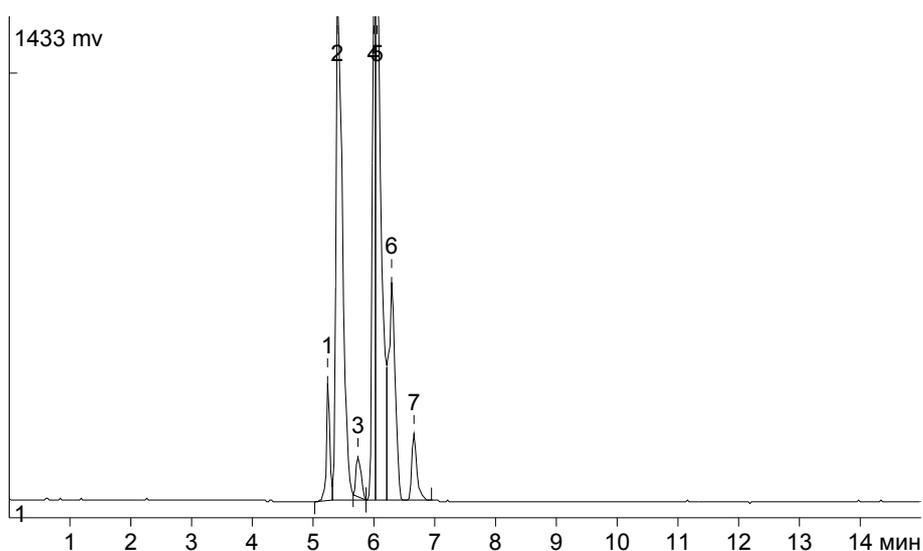


Рисунок 2 – Хроматограмма легких бензиновых фракций 100-140°C

**Заключение.** В данной работе нами были разработаны и апробированы подходы для применения метода твердофазной экстракции для определения нефтепродуктов в воде. Рассмотренный метод измерения основан на определении анализируемого компонента методом газовой хроматографии с ионизационно-пламенным детектированием и предварительным концентрированием пробы методом твердофазной микроэкстракции (SPME) равновесной газовой фазы.

#### **Список использованных источников**

1. Панасюгин А.С., Азаров С.М., Машерова Н.П., Сивак Ю.Б. Модульная система очистки вод различного происхождения от нефтепродуктов // Литейное производство и металлургия, 2005. – Вып. 2. – С. 179-181.
2. Волков С.М., Черновец А.Н. Новая конструкция устройства для осуществления микроэкстракции // Сорбционные и хроматографические процессы, 2011. – Т.11. – Вып 3. – С. 367-372.

### СЕКЦИЯ 3 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.311

#### СХЕМО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ SMART GRID

*М.И. Фурсанов, А.А. Золотой, В.В. Макаревич*

Городские электрические сети являются основным компонентом системы электроснабжения любого города, который осуществляет распределение электроэнергии по территории города с помощью сетей 6-10 кВ и содержит трансформаторные подстанции (ТП) и линии, соединяющие центры питания (ЦП) с ТП и ТП между собой, а также распределительные сети до 1000 В, питающие потребителей электрической энергии.

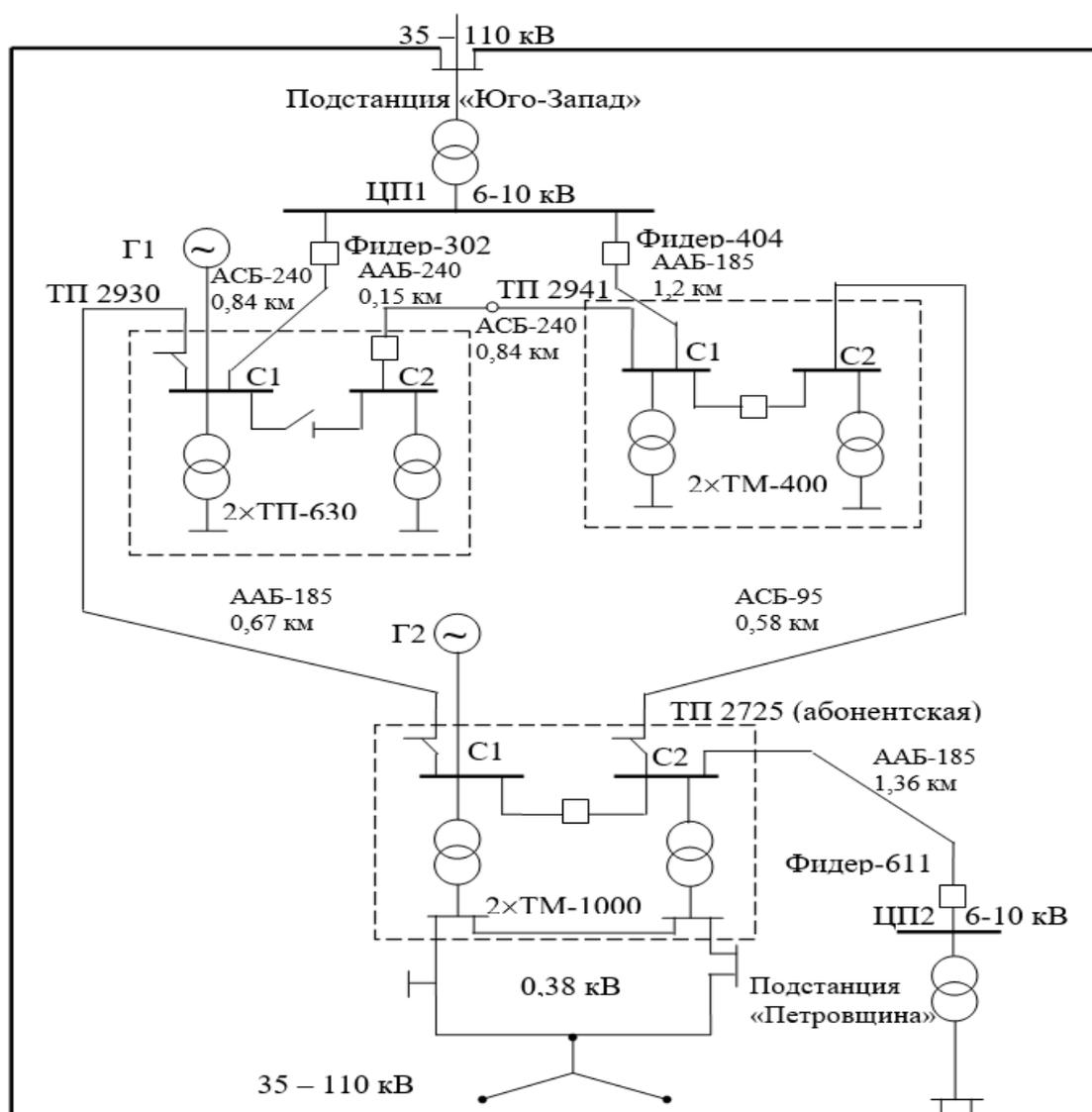


Рисунок 1 – Фрагмент городской электрической сети

Фрагмент городской электрической сети приведен на рис. 1 и состоит из двух питающих подстанций 35-110 кВ («Юго-Запад» и «Петровщина») (ЦП1 и ЦП2), трех распределительных линий (фидера 302, 404 и 611), трех понижающих подстанций 10/0,38 кВ (ТП 2930, 2941 и 2725), сети 0,38 кВ, подключенной к абонентской ТП 2725 и двух источников распределенной генерации – Г1(на шинах 10 кВ ТП 2930) и Г2 (на шинах 10 кВ ТП 2725).

Для анализа и оптимизации режимов городских сетей 6-10 кВ на кафедре «Электрические системы» БНТУ разработан и в РБ повсеместно эксплуатируется универсальный промышленно-вычислительный комплекс GORSR. Основными функциями комплекса являются: создание модели электрической сети в реальном времени и решение основных технических задач эксплуатации городских сетей - расчет и анализ режима, оптимизация точек разреза, оценка чувствительности максимальных токовых защит, расчет и анализ емкостных токов замыкания на землю, зарядных токов и т.д.

Новые условия функционирования электроэнергетики, повышение требований к технологическому состоянию отрасли, надёжности систем в большинстве развитых стран предопределили переход к реструктуризации электрических сетей энергосистем на базе инновационной организационной структуры SMART GRID (интеллектуальных электрических сетей).

Термин SMART GRID официально используется с 2003 года, однако единой трактовки этого понятия в мире до сих пор нет. В ОЭС Беларуси термин SMART GRID в распределительных электрических сетях определен стандартом ГПО «Белэнерго» СТП 09110.47.104-11.

### **Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID**

**Схемы распределительных городских электрических сетей** должны соответствовать определенным техническим решениям, мероприятиям и требованиям. В сетях с преобладанием кабельных линий электропередачи рекомендуется применять двухлучевую, а также петлевую схему построения сети.

Построение магистрали в сети напряжением 6-10 кВ от независимого источника питания до точки соединения, должно осуществляться через пункт АВР. При наличии на магистралях ВЛ-10 кВ ответвлений рекомендуется, в целях секционирования и сетевого резервирования в качестве отключающего аппарата применять реклоузеры (устройства с управляемым выключателем).

Для ответственных потребителей следует устанавливать устройство АВР 6-10 и 0,4 кВ, непосредственно во вводном устройстве потребителя.

На всех вновь вводимых ВЛ и КЛ 6- 10 кВ необходимо предусматривать установку устройств регистрации аварийных режимов с подключением их к телемеханике.

**К конструктивным можно отнести следующие решения:** в трансформаторных подстанциях вместо выключателей с механическими приводами необходима установка выключателей с поддержкой дистанционного управления по каналам связи устройств телемеханики. Применение реклоузеров позволяет удаленно управлять электроснабжением потребителей и автоматически отключать поврежденные участки сети. Применение современного оборудования, конструкций, материалов и эффективных технологий.

**Информационная система SMART GRID** строится на оперативно-информационных комплексах (ОИК). Для того, чтобы электрическая сеть превратилась в SMART GRID, недостаточно внедрения на ее объектах отдельных «умных» элементов. Требуется также адекватное информационное обеспечение, т.е. создание единого информационно-технологического пространства. Информация с цифровых подстанций SMART GRID концентрируется и передается на следующий уровень управления - в SMART-диспетчерские, потому, что цифровые подстанции в присутствии постоянного обслуживающего персонала не нуждаются.

Разработанные в РБ методические рекомендации предусматривают несколько этапов внедрения технологии SMART GRID в распределительных электрических сетях ОЭС Беларуси:

- автоматизация передачи и распределения энергии;
- установка “умных счетчиков” и обеспечение связи с ними;
- управление энергоснабжением жилых домов и коммерческих предприятий;
- формирование мощных центров обработки информации, поступающей от датчиков SMART GRID.

С учётом изложенного в стандарте предусматриваются практические меры для реализации первых шагов перехода распределительных сетей к SMART GRID.

#### **Выводы**

1. SMART GRID представляет собой сверхуправляемую, интеллектуальную, распределённую, самодиагностирующуюся и самовосстанавливающуюся систему, состоящую из информационно-телекоммуникационной и электроэнергетической частей.

2. SMART GRID является симбиозом электроэнергетики, электроники, информационных технологий, телекоммуникаций, сенсоров, программного обеспечения и математики.

3. Традиционно рассчитываемые режимные параметры в условиях SMART GRID являются наблюдаемыми, поэтому большинство задач управления режимами, характерные для традиционных городских распределительных сетей, в условиях SMART GRID в будущем теряют свою актуальность.

4. Задачи управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID требуют применения более сложных и дорогих многоуровневых математических моделей, учитывающих влияние разно-

образных средств регулирования, режимную реакцию активно-адаптивной части сетей и распределенной малой генерации, в том числе использующей нетрадиционные источники энергии.

5. Основным направлением развития автоматической системы управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID является разработка методов и алгоритмов распределенных расчетов на основе многоуровневых математических моделей с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях распределенных высокопроизводительных вычислительных систем.

УДК 621.311

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

*М.А. Короткевич*

Целесообразность применения более дорогих кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией рассмотрим применительно к кабельным линиям, выполненным кабелями:

– трехжильными площадью поперечного сечения жил 35-240 мм<sup>2</sup> напряжением 6-35 кВ;

– одножильными площадью поперечного сечения жил 35-240 мм<sup>2</sup> (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и трехжильными той же самой площади поперечного сечения жил (кабели с бумажно-масляной изоляцией) напряжением 6-35 кВ;

– одножильными площадью поперечного сечения жил 150-630 мм<sup>2</sup> (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и одножильными той же площади поперечного сечения жил (кабели маслонаполненные с бумажно-масляной изоляцией) напряжением 110 кВ.

Установлено, что увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,2-2,0 раза приведет к увеличению стоимости сооружения линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,1-1,48; 1,07-1,37; 1,11-1,57; 1,06-1,3 раза соответственно для линий напряжением 6-10; 20; 35; 110 кВ.

Комплексную оценку целесообразности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена дадим с использованием метода многоцелевой оптимизации.

Сравнительные технические характеристики силовых электрических кабелей с бумажно-масляной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжения 6...110 кВ приведены в таблице 1.

В терминах метода многоцелевой оптимизации задачу сформулируем следующим образом: необходимо оценить целесообразность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-110 кВ по срав-

нению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией при достижении следующих целей:

– минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий; максимума надежности работы; максимума удобства монтажа; максимальной длины линии без компенсации зарядной мощности; максимума допустимой разности высот прокладки кабеля; минимального воздействия на окружающую среду.

Значения критерия оптимизации для кабелей с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения критерия оптимизации

Наименование кабелей	Значения критерия оптимизации для кабелей		
	ААБ	ЦАСБ	АпвП
1. Трехжильные кабели на напряжение 10 кВ	0,558	0,615	0,959
2. Трехжильные кабели с бумажно-масляной изоляцией и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ	0,536	0,579	0,959
3. Одножильные маслонаполненные кабели с бумажно-масляной изоляцией типа МНС и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена типа ПвП на напряжение 10 кВ	0,536 (МНС)	–	0,967 (ПвП)

Как видно из таблицы, значение критерия оптимизации, характерное для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, превышает соответствующее значение критерия оптимизации для кабелей с бумажно-масляной изоляцией в 1,6-1,8 раза, что означает безусловную эффективность использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией.

УДК 621.3

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЕКЦИОНИРОВАНИЕ И ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ УЧАСТКОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

*Е.В. Калентионок*

*Белорусский национальный технический университет*

Автоматическое секционирование, т.е. деление линии на несколько участков с помощью автоматически управляемых коммутационных аппаратов, позволяет отключить только поврежденный участок. В этом случае значительно уменьшается недоотпуск электроэнергии и ущерб потребителей при возникновении повреждений в электрической сети и тем самым повышается надежность электроснабжения потребителей.

Задача оптимизации выбора секционирующих устройств в распределительной электрической сети сводится к определению типа, количества и мест установки коммутационных и защитных аппаратов. Данная задача традиционно называется оптимальным секционированием распределительных электрических сетей, а применяемое при этом оборудование – секционирующими устройствами. При этом необходимо четко понимать, что любое секционирующее устройство требует затрат.

В условиях рыночной экономики для оптимизации секционирования сети целесообразно использовать чистый дисконтированный доход (ЧДД). При установке секционирующего устройства в течение одного года, ЧДД при установке  $i$ -го секционирующего устройства предложено записывать в виде

$$\text{ЧДД}_i = \sum_{t=1}^T \frac{D_{ti} - I_{ti} - K_{ti}}{(1 + E)^t}, \quad (1)$$

где  $T$  – расчетный период;  $D_{ti}$  – доход от  $i$ -го секционирующего устройства в год  $t$ ;  $I_{ti}$  – издержки в  $i$ -е секционирующее устройство в год  $t$ ;  $K_{ti}$  – капитальные затраты в  $i$ -е секционирующее устройство в год  $t$ ;  $E$  – норма дисконта.

Установка  $i$ -го секционирующего устройства целесообразна, если выполняется условие:

$$\text{ЧДД}_i > 0. \quad (2)$$

Результаты расчетов  $\text{ЧДД}_i$  при различных значениях удельного ущерба у потребителей представлены в виде графика 1, приведенного на рисунке. Поскольку чистый дисконтированный доход при принятых параметрах имеет отрицательное значение, то установка реклоузера на рассматриваемой линии экономически не целесообразна.

Зависимости 2 и 3 рисунка построены для двух других линий электропередачи различной длины и мощности потребителей. Для этих линий экономически целесообразна установка секционирующего устройства при  $u > 2$  руб/кВт·ч (зависимость 2) и при  $u > 1$  руб/кВт·ч (зависимость 3).

Автоматическое выделение поврежденной сети может быть реализовано путем:

- централизованного автоматического управления – команды о переключениях формируются верхним уровнем автоматизации электрических сетей с использованием программного обеспечения, входящего в состав комплекса АСДУ, на основании анализа телеметрической информации с объектов автоматизации и динамической модели сети;
- децентрализованное автоматическое управление – команды о переключениях формируются непосредственно на объекте автоматизации,

пусковыми факторами которого являются величина тока короткого замыкания или факт отсутствия/наличия напряжения на контролируемом участке сети;  
– комбинация централизованного и децентрализованного управления.

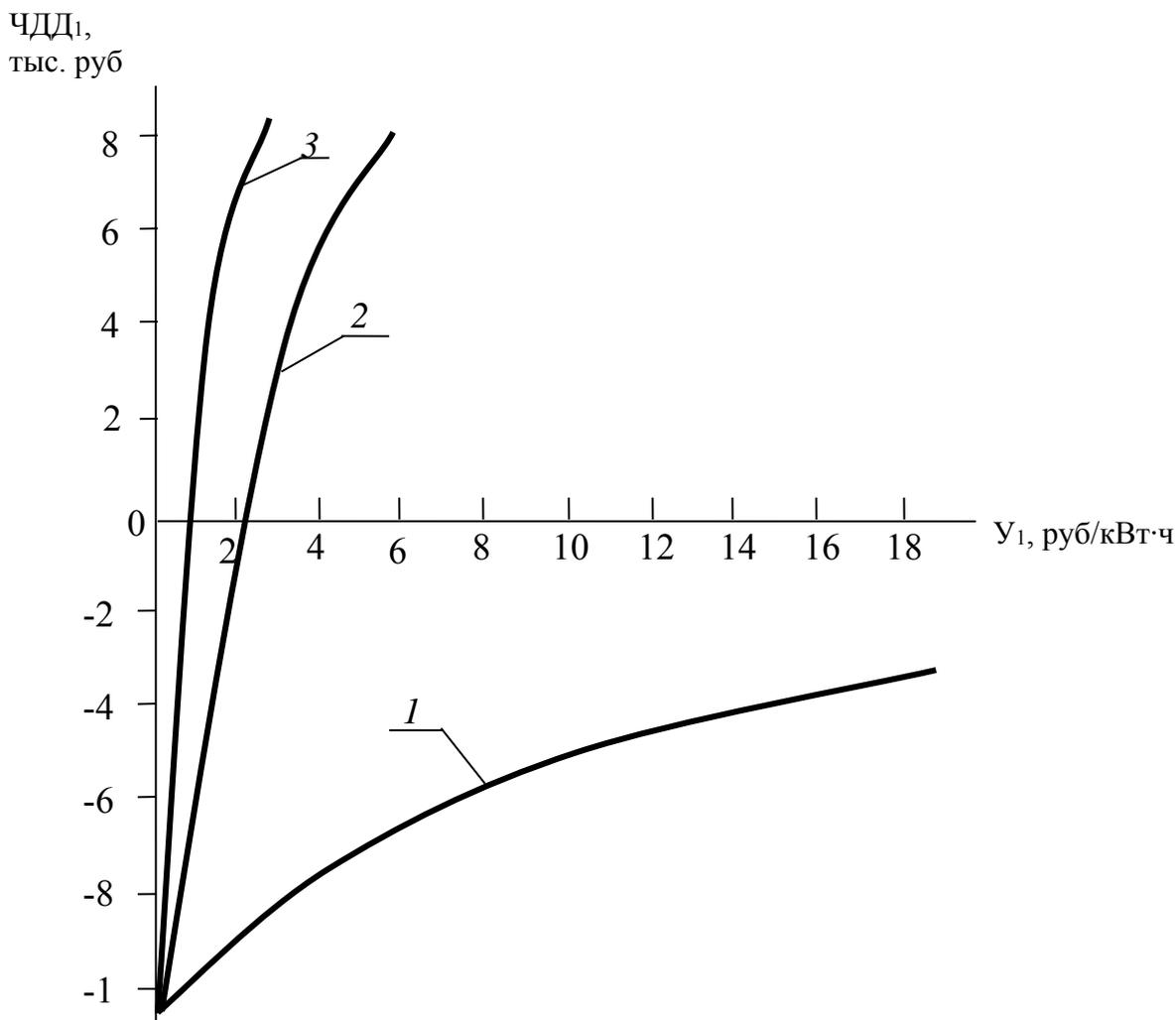


Рисунок 1 – Зависимость чистого дисконтированного дохода от удельного ущерба у потребителей от перерыва электроснабжения: 1 – линия  $L = 9,27$  км,  $P = 459$  кВт; 2 – линия  $L = 13,9$  км,  $P = 890$  кВт; 3 – линия  $L = 15,8$  км,  $P = 2010$  кВт

Децентрализованное управление переключениями при аварийных повреждениях применяется в сетях, питающих потребителей 1-ой категории. Централизованное управление переключениями может применяться в сетях, питающих потребителей 2-ой и 3-ей категорий.

### Выводы

1. В современных условиях функционирования распределительных электрических сетей энергосистем обоснование целесообразности дополнительных затрат на установку устройств автоматического секционирования возможно только по критериям общественной (социально-экономической) эффективности, отражающим интерес всех субъектов хозяйствования (электрических сетей и потребителей электроэнергии).

2. Необходимость и эффективность установки дополнительных секционирующих устройств, зависит от их типа и стоимости, ущербов потребителей от перерывов электроснабжения, технического состояния и длины распределительных линий электропередачи, затрат электрических сетей на поиск повреждений выполнения технических ограничений в электрической сети.

УДК 621.32

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ**

*В.Б. Козловская, В.Н. Калечиц*

*Белорусский национальный технический университет*

Основной задачей систем наружного освещения является осуществление бесперебойной работы осветительных установок улиц, дорог, транспортных тоннелей и т.п. для повышения безопасности людей. На создание единой световой среды населённого пункта, формируемой наружным освещением, влияет система управления, обеспечивающая удобство эксплуатации и комфортность освещения. Современные системы управления наружным освещением позволяют осуществлять рациональное использование электроэнергии, увеличивать срок службы источников света путём исключения нежелательных режимов и обеспечивать надёжную работу осветительных установок.

Управление сетями наружного освещения должно быть централизованным (телемеханическим или дистанционным). Возможность местного управления должна предусматриваться в наружном освещении больниц, школ, яслей, стадионов, гостиниц и т.п. При использовании местных систем управления нет возможности оперативного контроля состояния осветительных сетей, шкафов освещения; отсутствуют централизованные команды на включение и отключение, регулирование светового потока. Энергоэффективность работы таких систем также в этом случае низка.

Местное управление освещением может являться дополнением централизованной системы управления. Для периферийных районов города, где затруднена возможность получения прямых телефонных пар и организации других каналов связи (GSM связь, радиосвязь и т.д.), управление наружным осуществляется в пределах одной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ.

В этом случае управление реализуется автоматически с применением электронных устройств, в которых заложена годовая программа включения и отключения в соответствии с графиком работы наружного освещения. В виде исключения используют встраиваемые фотоэлектрические устройства для включения и отключения осветительной линии в зависимости от уровня освещённости. Фотодатчик устройства должен быть рассчитан на работу вне помещений, защищен от посторонней засветки и налипа-

ния снега на выходное отверстие фотоприемника [1], которые могут приводить к некорректным режимам работы.

Особое место занимают автономные осветительные установки. В наружном освещении в местах, относительно удалённых от пунктов питания, зачастую следует рассматривать возможность использования автономных осветительных установок, работающих на солнечной энергии.

Система управления наружным освещением города формируется в зависимости от численности жителей. Централизованное телемеханическое управление используется при количестве жителей более 50 тыс. человек, централизованное дистанционное – при количестве жителей до 20 тыс.; если численность населения от 20 тыс. до 50 тыс. человек, то применяют централизованное телемеханическое или дистанционное управление.

Централизованное управление в основном базируется на применении контакторов в линиях наружного освещения, а также использовании дистанционно управляемых автоматов. Сети наружного освещения городов, как правило, используют каскадную систему управления участками распределительных линий наружного освещения, что реализуется с помощью подключения катушки коммутационного аппарата второго участка в линию первого, катушки третьего участка в линию второго и т.д. В воздушно-кабельных сетях допускается включение в один каскад до 10 пунктов питания, а в кабельных – до 15 пунктов питания сети уличного освещения [1].

Современные системы управления наружным освещением формируются на основе трёх уровней: светильники, пункт питания и диспетчерский пункт. Применяемое оборудование и схемные решения в системе управления наружным освещением разнообразны и зависят от задействованных источников света, способа передачи команд, данных между тремя уровнями.

Основными функциями современной автоматизированной системы централизованного управления освещением городов являются:

- централизованное включение и отключение в зависимости от времени суток;
- смена режима работы осветительных сетей;
- измерение и контроль значений токов, напряжений;
- ведение графика нагрузок, получение информации по расходу электроэнергии;
- контроль целостности осветительных сетей и т.д.

Энергоэффективность работы сети наружного освещения определяется используемыми источниками света, а также способами и средствами реализации систем управления. Эффективной следует считать такую осветительную установку, которая создаёт высококачественное освещение и сохраняет свои характеристики на протяжении длительной работы при наименьших капитальных и эксплуатационных затратах, в том числе при минимальном энергопотреблении [2].

В утилитарном наружном освещении нет требований, относящихся к цветовым характеристикам источников света, поэтому наиболее целесо-

образным является применение ламп типа ДНаТ, обладающих большими световой отдачей и сроком службы по сравнению с лампами ДРЛ. Светодиодные источники обладают рядом преимуществ по сравнению с другими источниками света, но их относительно высокая стоимость на сегодняшний день ограничивает широкое использование в наружном освещении.

Создание оптимальных режимов работы осветительных сетей позволяет снизить расходы на электроэнергию, текущий ремонт и обслуживание осветительных установок. В наружном освещении предусматривают вечерний и ночной режимы работы.

Ночной режим применяется для экономии электроэнергии в часы снижения транспортных потоков и другой активности населения.

Широко используется переход на ночной режим путем отключения фазы осветительной линии. Главное достоинство отключения части светильников заключается в простоте реализации, отсутствии необходимости установки дополнительного оборудования. Но такой способ экономии электроэнергии приводит к появлению значительной неравномерности освещенности, переходу на несимметричный режим работы осветительной линии. Не допускается отключение подряд двух светильников, а также отключение светильников на отдельных участках города, перечисленных в [1].

Допускается также снижать уровень освещенности (не ниже 50% от нормируемого значения согласно [3]) с помощью регуляторов в зависимости от степени уменьшения интенсивности движения. Примерами такого регулирования являются:

- снижение напряжения в пункте питания с помощью регуляторов напряжения;

- применение светильников с двухступенчатыми ЭмПРА.

Регуляторы напряжения в пункте питания позволяют поддерживать напряжения на необходимом уровне для обеспечения оптимальных режимов работы. Пункт питания наружного освещения подключаются к трансформаторной подстанции, основную долю нагрузки которой составляет силовая. Поэтому в зависимости от схемных решений, графика нагрузок, характера и мощности силовой нагрузки напряжение в пункте питания меняется. Длительная работа светильников с напряжением на их зажимах выше номинального приводит к сокращению срока службы ламп, выходу из строя ЭмПРА. Если напряжение на зажимах светильника снижается на 10 % и более от номинального напряжения, то при включении осветительной линии это может приводить к тому, что часть задействованных в линии ламп не будет зажигаться. Применяя регуляторы (стабилизаторы) напряжения, имеется возможность регулировать напряжение в пункте питания, что позволит улучшить режим работы осветительной линии, в том числе избежать несимметрии напряжений в фазах пункта питания.

Ночной режим реализуется путем ступенчатого снижения напряжения в пункте питания. Можно предусматривать несколько ступеней, обеспечивая плавное снижение напряжение в линии. При этом важным

условием является то, что зажигание ламп ДНаТ необходимо производить при номинальном напряжении.

Двухступенчатые ЭмПРА с возможностью понижения мощности отличаются от обычных ЭмПРА тем, что имеют две обмотки электромагнитного дросселя, переключатель мощности с настраиваемым таймером, что позволяют автоматически снижать мощность в заданные промежутки времени. Для светильников с ЭмПРА, которые понижают активную мощность на 40%, при переходе на режим экономии электроэнергии световой поток уменьшается на 50%.

На показатели освещенности и яркости влияет величина светового потока применяемых источников света. Снижение уровня напряжения на зажимах светильника приводит к уменьшению светового потока и ухудшению качества освещения, но не вызывая значительной неравномерности освещенности, которая присутствует при отключении части светильников.

#### **Список использованных источников**

1. ТКП 45-4.04-287-2013 «Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования». – Мн: Министерство архитектуры и строительства, 2013. – 19 с.
2. Справочная книга по светотехнике/ Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
3. ТКП 45-2.04-153-2009 «Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования». – Мн: Министерство архитектуры и строительства, 2010. – 100 с.

УДК621.311.22

### **СЕМАНТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*В.А. Анищенко, Т.В. Писарук*

*Белорусский национальный технический университет*

Надежность эксплуатации энергетических систем во многом определяется достоверностью измерения переменных, характеризующих состояние энергетического оборудования. К ним относятся электрические токи, напряжения, мощности, потоки электрической и тепловой энергии, давления, температуры. Известны синтаксические и семантические методы контроля достоверности информации [1]. Результаты измерений при синтаксическом контроле рассматриваются как последовательности символов, связанных между собой конструктивными правилами в рамках формализованной системы. При синтаксическом контроле диагностируется состояние вычислительного комплекса, обрабатывающего результаты измерений, с помощью цифровых кодов [2]. Синтаксический подход не учитывает технологическую сущность измеряемых данных и не позволяет обнаруживать все возможные недостоверные переменные.

Семантический контроль основан на использовании технологического смысла измеряемых данных, их непротиворечивости и согласованности, а также на априорной информации о вероятностных характеристиках переменных. Семантический контроль учитывает технологический контекст задачи и доопределяет на содержательном уровне алгоритмы контроля, конструктивное построение которых не представляется возможным. Это повышает вероятность обнаружения грубых погрешностей измерений [3]. Необходимым условием контроля достоверности является информационная избыточность об измеряемых переменных. В зависимости от вида избыточности различают контроль по предельным значениям переменных, их первым приращениям, на основе уравнений взаимосвязей между переменными.

Условие достоверности измерения  $x(t)$  по предельным значениям имеет вид

$$a(t) \leq x(t) \leq b(t),$$

где  $a(t)$  и  $b(t)$  – соответственно нижняя и верхняя границы достоверных значений измеряемой переменной в нормальном режиме работы.

Разрешающую способность этого метода можно повысить путем оптимального сужения диапазона достоверных значений  $b(t)-a(t)$  на основе теории статистических решений по критерию минимума средней цены распознавания недостоверных измерений [3]

$$C = (1 - q)C_1F_1 + qC_2F_2,$$

где  $q$  – априорная вероятность грубой погрешности,

$C_1$  – цена ошибки 1-го рода (ложной тревоги),

$C_2$  – цена ошибки 2-го рода (пропуска недостоверного измерения),

$F_1$  – вероятность ошибки 1-го рода,

$F_2$  – вероятность ошибки 2-го рода.

Условие достоверности измерения по первым приращениям имеет вид

$$|x(t) - x(t-h)| \leq d,$$

где  $h$  – интервал временной дискретизации,

$d$  – граница принятия решения о достоверности измерения.

Разрешающая способность контроля по первым приращениям повышается при использовании фильтра экстраполяции значений переменной. Тогда условие достоверности примет вид

$$|x(t) - x_3(t)| \leq d,$$

где  $x_3(t)$  – экстраполированное в предыдущий момент времени  $t-h$  на текущий момент времени  $t$  значение переменной

$$x_{\sigma}(t) = x(t-h) + k[x(t-h) - x(t-2h)].$$

Коэффициент  $k$  определяется по критерию минимума дисперсии рас- согласования измеренных и экстраполированных значений переменной. Условия достоверности измерений взаимосвязанных переменных выглядят следующим образом:

$$|\delta_1(t)| \leq \delta_{1o}, |\delta_2(t)| \leq \delta_{2o}, \dots, |\delta_n(t)| \leq \delta_{no},$$

где  $\delta_1(t), \delta_2(t), \dots, \delta_n(t)$  – фактические, а  $\delta_{1o}, \delta_{2o}, \dots, \delta_{no}$  – допустимые невязки в уравнений связи, соответствующие классам точности измерительной аппаратуры.

Вероятностная природа грубых погрешностей измерений не гарантирует обнаружение всех грубых погрешностей. Максимум вероятности обнаружения недостоверных измерений достигается многопризнаковым контролем, основанным на совместной обработке результатов контроля всеми однопризнаковыми методами. Обнаружение недостоверных показаний приборов автоматически замещаются их наиболее вероятными значениями, что обеспечивает непрерывное функционирование системы сбора и обработки информации.

Реализация рассматриваемых методов семантического контроля в автоматизированных системах управления на электрических станциях, понижительных электрических подстанциях, на промышленных предприятиях позволит повысить эксплуатационную надежность энергосистемы в целом.

#### **Список использованных источников**

1. Левин Г.Я. О соотношении синтаксического и семантического подходов к задаче поиска допустимых значений параметров / Г.Я. Левин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Проблемы повышения эффективности производства. – Л., 1977. – Вып. 225. – С. 53-56.
2. Глазунов Л.П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Л.П. Глазунов, В.П. Грабовецкий, О.В. Щербаков. Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
3. Анищенко А.В. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / А.В. Анищенко. Минск: БГПА, 2000. – 128 с.

УДК 621

#### **КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

*И.В. Новаш, Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев*

*Белорусский национальный технический университет*

*e-mail: faromanuk@bntu.by, novashiv@tut.by*

На кафедре «Электрические станции» БНТУ накоплен большой опыт по математическому моделированию электроэнергетических объектов и разработке компьютерных программ для исследования поведения устройств релейных защит и их моделей методом вычислительного эксперимента.

Так для проведения испытаний цифровых устройств релейной защиты с помощью испытательного комплекса СМС 356 компании OMICRON разработаны компьютерные программные комплексы (КПК), позволяющие получать методом вычислительного эксперимента входные информационные сигналы релейных защит линий электропередачи и силовых трансформаторов (рис. 1).

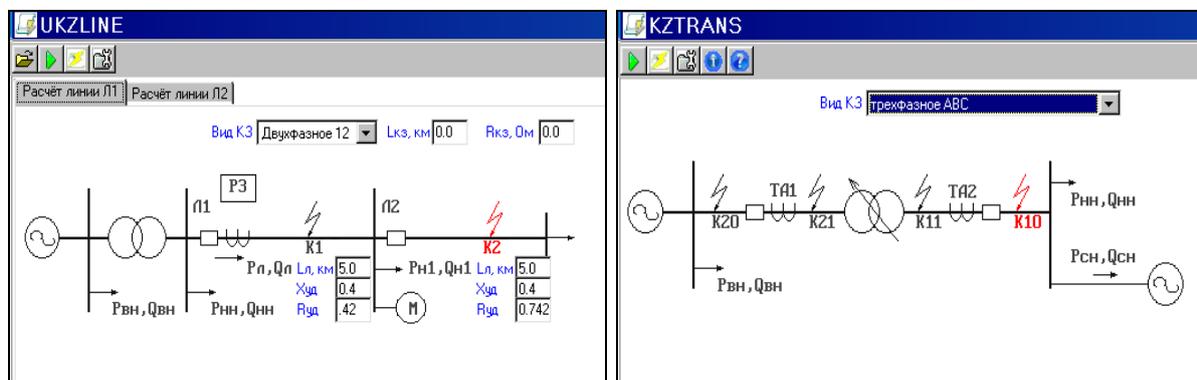


Рисунок 1 – Программные комплексы для расчета режимов удаленных замыканий линий электропередачи 6(10)-35 кВ и силового трансформатора

Основным достоинством разработанных КПК является то, что они позволяют выполнять расчеты входных сигналов защиты – вторичных токов трансформаторов тока – с учетом их несинусоидальных форм, обусловленных наличием в энергосистеме нелинейных элементов, и насыщения магнитопроводов силового и измерительных трансформаторов (рис. 2), что в большей степени соответствует реальным условиям аварийных режимов. Результаты расчетов программных комплексов сохраняются в формате COMTRADE, и могут быть использованы в качестве исходных данных испытательных комплексов.

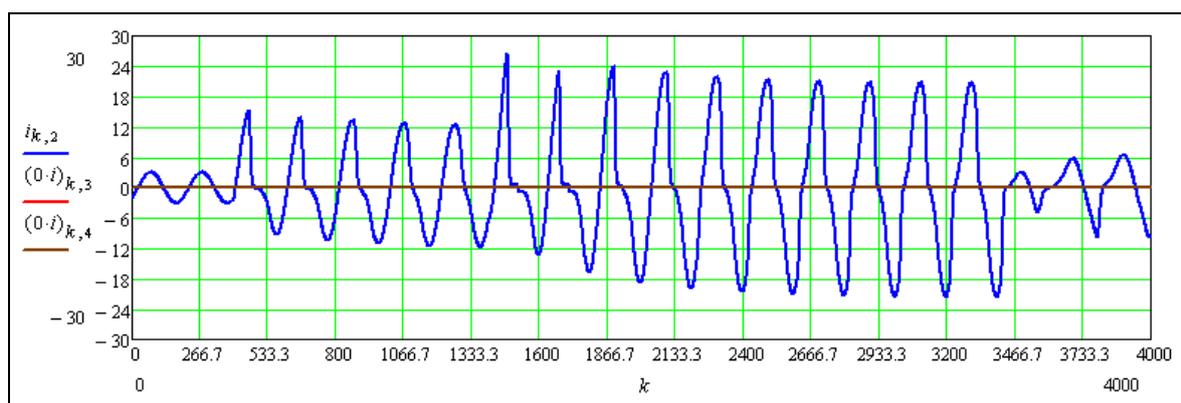


Рисунок 2 – Вторичный ток трансформатора тока аварийного режима

Применение системы динамического моделирования Matlab-Simulink позволяет создавать компьютерные испытательные комплексы (КИК), совместно моделирующие защищаемый объект (рис. 3) и исследуемую защиту (рис. 4). Основным достоинством таких КИК является то, что они

могут быть реализованы только с использованием персонального компьютера и позволяют проводить испытания модели защиты на стадии проектирования и отработки ее функциональных возможностей методом вычислительного эксперимента.

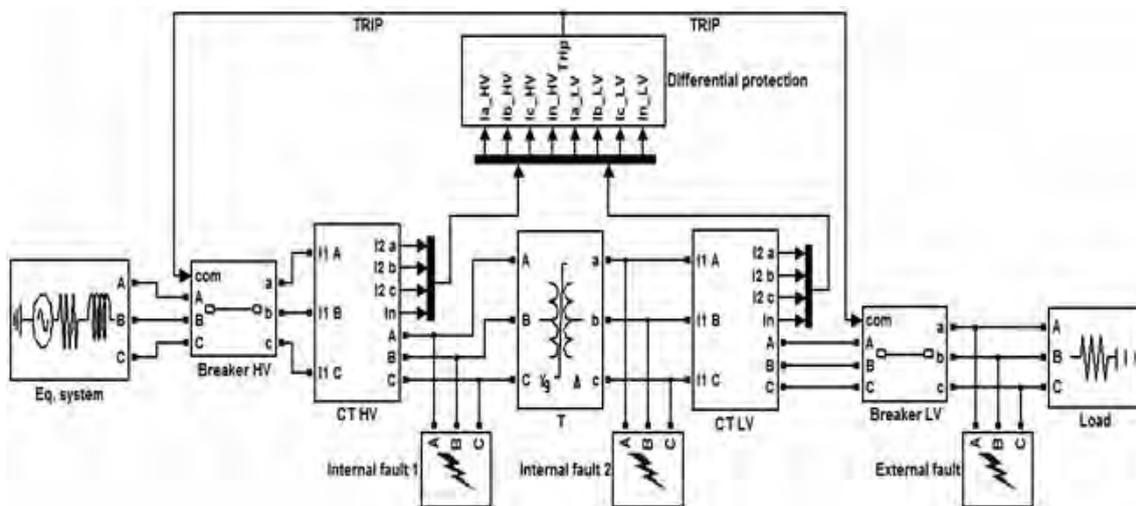


Рисунок 3 – Компьютерный испытательный комплекс дифференциальной защиты силового трехфазного трансформатора

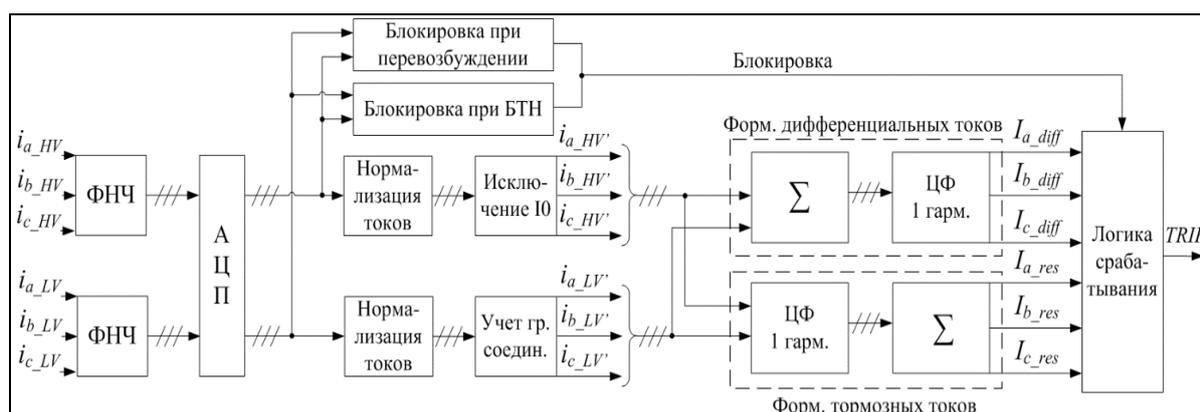


Рисунок 4 – Блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов микропроцессорной токовой защиты

На рис. 4 приведена блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов тока со стороны высокого напряжения ( $HV$ ) и низкого напряжения ( $LV$ ) защищаемого силового трехфазного трансформатора. Входные токи  $i_{a\_HV}$ ,  $i_{b\_HV}$ ,  $i_{c\_HV}$  – вторичные токи трехфазной группы трансформаторов тока, расположенной с высшей стороны силового трансформатора; входные токи  $i_{a\_LV}$ ,  $i_{b\_LV}$ ,  $i_{c\_LV}$  – вторичные токи трехфазной группы трансформаторов тока, расположенной с низшей стороны силового трансформатора.

Проведение испытаний устройств цифровых защит осуществляется с помощью испытательных комплексов.

В состав испытательного комплекса (рис. 5) входит персональный компьютер, в котором реализуется модель энергосистемы или обобщенного электроэнергетического объекта (ОЭО) и программное обеспечение, управляющее испытательным устройством и режимом проведения испытаний. В качестве испытательного устройства могут быть использованы микропроцессорные аппаратно-программные диагностические комплексы НПП «Динамика» (Россия) типа «РЕТОМ», компании OMICRON или аналогичные комплексы других производителей.

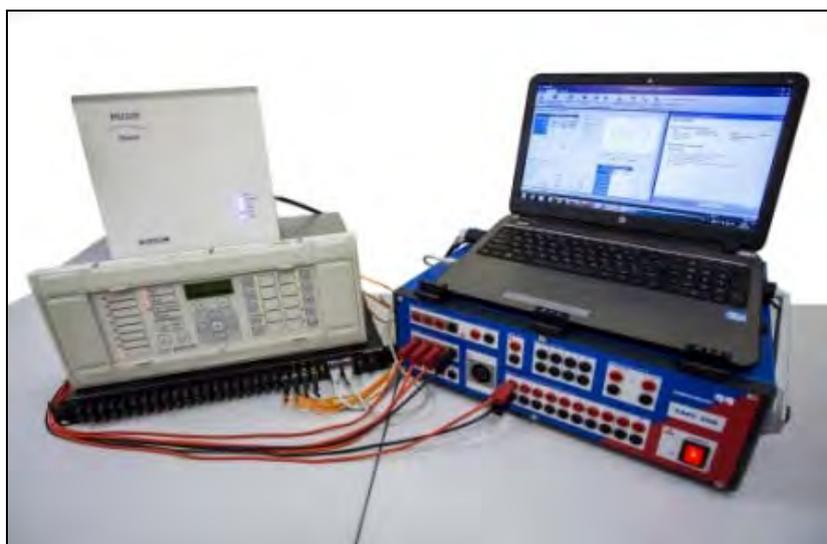


Рисунок 5 – Аппаратно-программный испытательный комплекс на базе устройства СМС 356 компании OMICRON

Моделирование ОЭО проводится с помощью компьютерных программных комплексов, которые могут быть в виде самостоятельных программных продуктов или реализованы в компьютерных системах динамического моделирования типа Matlab-Simulink.

Накопленный опыт в моделировании энергосистем и испытании устройств релейной защиты [1, 2] позволяет рекомендовать на начальной стадии разработки новых устройств отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов, а использовать более дешевые и безопасные компьютерные испытательные комплексы.

#### **Список использованных источников**

1. Новаш И.В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И.В. Новаш, Ф.А. Романюк. – Минск: БНТУ, 2013. – 226 с. – ISBN 978-985-550-236-5.
2. Новаш И.В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени / И.В. Новаш. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – № 3. – С. 198–210.

Формирования электроэнергетики в соответствии с концепцией Smart Grid основан на целостной системе подходов, принципов и инструментов создания технологической базы с целью преобразования электроэнергетической отрасли в соответствии с растущими требованиями к энергетической и экологической эффективности экономики.

Концепция «умные сети» основана на внедрении «интеллектуального учета», «интеллектуальной сети», «энергоэффективности», «потребительских технологий». Концепция формирования Smart Grid в области организации «интеллектуального учета» получила государственную поддержку в Российской Федерации, что закреплено в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [2].

С экономической точки зрения внедрение Smart Grid в российской электроэнергетике рассматривается как средство увеличения экономической и энергетической эффективности экономики. Внедрение «умных сетей» способствует регулированию спроса на электроэнергию и снижению ее издержек в электрических сетях; увеличению пропускной способности действующих и новых линий электропередачи; точному мониторингу и регулированию режимов потребления электроэнергии; снижению площади земель, отводимых под электросетевые коммуникации.

Переход к инновационному варианту развития на основе интеллектуальной энергетики будет сопровождаться существенным уменьшением вводов новых электростанций и связанных с ним сетевых объектов для выдачи мощности. Вследствие, чего снижение капиталовложений является наиболее значимым системным экономическим эффектом.

Наиболее крупным эффектом является снижение топливных расходов электростанций. Дополнительный эффект может быть достигнут с учетом экономической стоимости выбросов парниковых газов.

В качестве примера рассмотрим моделирование внедрения умных сетей на территории единой энергетической системы (ЕЭС) Российской Федерации.

Для предварительной оценки возможных системных эффектов в ЕЭС России при создании интеллектуальной электроэнергетики были использованы данные по результатам пилотных проектов Smart Grid, осуществление которых начата в разных странах. Согласно многим причинам сохраняется крайне высокая неопределенность ожидаемых результатов от внедрения элементов Smart Grid. Результаты представлены ниже на рис. 1:



Рисунок 1 – Количественная оценка изменения балансовых условий в ЕЭС России при развитии интеллектуальной энергетики

Сравнение экономических результатов и необходимых затрат на формирование «умной сети» показывает, что уже к 2030 г. экономические выгоды от реализации проекта интеллектуальной энергетики в масштабе ЕЭС Российской Федерации окажутся сопоставимыми с необходимыми капиталовложениями.

Актуальность инновационного развития российской электроэнергетики на основе интеллектуальной энергосистемы обусловлена низким потенциалом увеличения производительности применения энергоресурсов и ограниченностью инвестиционных ресурсов.

Smart Grid объединяет в себе новые коммуникационные и энергоэффективные технологические процессы и является элементом глобальной программы интеграции во всеобщую систему применения возобновляемых источников энергии. В ней рассматриваются возможности объединения систем накопления энергии и распределенных генерирующих мощностей, а также формирования всеобщей сенсорной сети, позволяющей осуществлять мониторинг и оптимизацию локальных процессов производства и потребления электроэнергии [3].

Использование технологий «умные сети» преследует целью обеспечения надежности и увеличения производительности функционирования всего электросетевого комплекса. В целом же решение задач энергосбережения и увеличения энергетической эффективности экономики на основе этой концепции даст возможность упростить процессы продвижения и распространения инновационных энергосберегающих технологий, а так-

же нормализовать технологические регламенты и методики энергетического анализа и аудита.

#### **Список использованных источников**

1. Валеев И. "Умные" электрические сети. – М.: Palmarium Academic Publishing, 2015. – 172 с.

2. Концепция энергетической стратегии России на период до 2030 года (проект). Прил. к журналу “Энергетическая политика”. – М.: ГУ ИЭС, 2016.

3. Боровиков В. А. Электрические сети энергетических систем. Учебник / В.А. Боровиков, В.К. Косарев, Г.А. Ходот. – М.: Энергия, 2016. – 392 с.

## СЕКЦИЯ 4

### ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЭС И АЭС

УДК 629.76

#### ПРИМЕНЕНИЕ АБСОРБЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СИСТЕМЕ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

*С.И. Страчинский, В.В. Янчук*

*Белорусский национальный технический университет*

Республика Беларусь импортирует около 85% первичных энергоресурсов. Поэтому увеличение эффективности использования данных ресурсов является главным из направлений в решении проблемы современности энергетики – энергосбережения [1]. Поэтому в этой сфере основными можно считать следующие виды деятельности: реализация мероприятий, связанных с развитием возобновляемых и нетрадиционных источников энергии и использованием возобновляемых энергоресурсов; разработка высокоэффективных систем управления энергосбережением и средств контроля за эффективным использованием тепловых энергоресурсов.

В связи с этим, все большую актуальность приобретают вопросы применения тепловых насосов для использования низкопотенциальных источников теплоты. Особенно популярны в последнее время абсорбционные насосы, на привод которых используется более дешевая тепловая энергия, по сравнению с необходимостью подвода дорогостоящей электрической энергии к парокompрессионным машинам.

Абсорбционный тепловой насос использует подведенную теплоту для повышения низкой температуры теплового потока из окружающей среды – например, теплоту сбросных потоков, солнечную, геотермальную – до такого температурного уровня, при котором он может быть полезно использован. Теплота, которая подводится к тепловому насосу при высокой температуре, затем снова используется в среднем температурном уровне вместе с теплотой из окружающей среды, которая абсорбируется при низкой температуре с последующим повышением температурного уровня. Такое преобразование тепловых потоков, выполняемое при помощи абсорбционного теплового насоса, основано на повышении температуры кипения раствора хладагента по сравнению с чистым хладагентом. Абсорбционная теплонасосная установка состоит из четырех главных элементов – испаритель, абсорбер, конденсатор и генератор, которые работают на двух разных уровнях давления. Хладагент испаряется при низком давлении в испарителе и возвращается в жидкую фазу в абсорбере, повышая концентрацию раствора. Затем в генераторе раствор кипит при высоком давлении, происходит испарение чистого хладагента и восстановление сорбционной способности раствора. Полученный хладагент конденсируется в конденсаторе и возвращается в испаритель. Раствор хладагента циркулирует между абсорбером и генератором, обеспечивая не-

прерывность действия установки. Теплообменник служит для регенерации значительного количества теплоты внутри контура раствора, увеличивая эффективность работы цикла. Испарение хладагента и восстановление раствора обеспечиваются за счет подвода теплоты из окружающей среды и высокопотенциальной теплоты. В процессе абсорбции и конденсации полезная теплота выделяется в абсорбере и конденсаторе [2].

Абсорбционные тепловые насосы представляют собой одноступенчатые и двухступенчатые установки с работающие на водном растворе бромида лития. Тепловая эффективность одноступенчатых установок (COP – коэффициент преобразования – отношение полученной полезной теплоты к подведенной) составляет около 1,7. Вследствие более высокой температуры подведенной теплоты, тепловая эффективность двухступенчатых установок достигает примерно 2,2. Следовательно, применением абсорбционных тепловых насосов можно сэкономить около 50% первичной энергии, требуемой для получения необходимого количества теплоты. Получаем даже большую экономию первичной энергии по сравнению с пароконпрессорными тепловыми насосами, где необходимо учитывать коэффициент преобразования энергии топлива в электрическую на электростанции, чтобы оценить затраты первичной теплоты на получение конечного количества полезной теплоты.

Установки на бромиде лития широко применяются для производства охлажденной воды в сфере комфортного кондиционирования. Одна и та же рабочая жидкость и одна и та же конструкция главных элементов теплового насоса может применяться для полезно используемой теплоты с температурой от 10 °С до 180 °С и тепловой мощности от 50 до 5000 кВт. Это упрощает развитие таких установок специального назначения по сравнению с пороконпрессорными тепловыми насосами, где для обеспечения соответствия требованиям заказчика всегда необходимо подбирать подходящий хладагент и компрессор, учитывая температурные уровни, коэффициент сжатия, мощность и т.д.

Тепловой расчет абсорбционных тепловых насосов основывается на теплофизических свойствах рабочего тела. Если рабочее тело – бромид лития, температура источника теплоты должна быть выше температуры кристаллизации воды и концентрация соли в растворе должна быть ограничена, чтобы избежать кристаллообразования.

В зависимости от применения, тепловой насос может выполнять несколько функций, таких как повышение температуры источника до уровня полезного использования или постепенное падение температуры внешних теплоносителей, т.е. цепь источников теплоты, цепь полезной теплоты или источник приводной теплоты. Для оптимизации работы теплового насоса применяются многоступенчатые циклы или, так называемые, сдвоенные конструкции. С применением многоступенчатости разница температур высокопотенциального, низкопотенциального источников теплоты и температура выходного потока, может варьироваться. Одновременно с увеличе-

нием разности температур при применении двухступенчатого цикла происходит увеличение COP. Сдвоенные конструкции элементов, работающих при низком давлении – испаритель/абсорбер или работающих при низком давлении – генератор/конденсатор, могут применяться для сглаживания больших разностей температур внешних источников теплоты.

За рубежом теплонасосная техника находит широкое применение для целей теплоснабжения жилых и офисных зданий более 30 лет.

В Мюнхене в новом развивающемся спальном районе с 300 домами установлена местная система отопления с использованием солнечной энергии. На всех крышах с южной ориентацией установлены солнечные панели; их общая площадь составляет 3600 м<sup>2</sup>. На строительной площадке смонтирован накопительный бак для горячей воды емкостью около 5700 м<sup>3</sup> и общей высотой 16 м. Такая система хранения теплоты позволит покрывать часть зимней отопительной нагрузки за счет солнечной энергии, накопленной в летний период, хранящейся при температурах, достигающих 90 °С [3].

Для повышения эффективности хранения энергии, в инновационную систему отопления с использованием солнечной энергии встраивается абсорбционный тепловой насос. После прямого использования горячей воды из накопителя, вода с низкими температурами в интервале от 45 °С до 19 °С будет подводиться к испарителю теплового насоса. Таким образом годовое количество солнечной энергии, которую можно передать в отопительную систему, возрастает и уменьшается количество теплоты, которую необходимо подводить от стороннего источника. При этом не требуется увеличивать размеры наиболее дорогостоящих элементов, системы солнечных коллекторов и накопительного бака. Приводом абсорбционного насоса является горячая вода из подающей магистрали системы городского районного отопления.

Для обеспечения надежной работы в изменяющихся условиях на протяжении отопительного периода, тепловой насос спроектирован на температуру обратной воды системы отопления в интервале 20–40 °С, которая входит в абсорбер, и температуру потока, выходящего из конденсатора, около 55 °С. В цикле циркуляционной воды (источник теплоты/сезонный накопитель) на протяжении отопительного сезона температура подводимой к испарителю теплоты падает с 45 °С до 10 °С. Предполагается, что температура выходящего из испарителя потока составит 5–10 °С в конце отопительного периода для более полного использования всей накопленной теплоты. Температура в системе отопления зависит от температуры окружающей среды и лежит в интервале от 120 °С до 90 °С.

Чтобы достичь повышения температуры примерно на 45 °С между выходом из испарителя и выходом из конденсатора и больших перепадов температур в трех внешних контурах теплоносителей, т.е. около 10 К в контуре охлажденной воды, 25 К в контуре циркуляционной воды, 30 К в контуре горячей воды, для применения были выбраны сдвоенные конструкции испарителя/абсорбера и генератора/конденсатора, что эквива-

лентно последовательному соединению одноступенчатых установок. Таким образом, данная установка включает в себя восемь главных теплообменных аппаратов и четыре ступени давления, т.е. два разных уровня давления в испарителе и два в конденсаторе, и каждый внешний контур воды последовательно проходит через две абсорбционные установки. Такая схема позволяет получить значительную площадь общей поверхности восьми теплообменников и высокий коэффициент COP теплового насоса, равный 1,7. Эти два абсорбционных агрегата были объединены в одну установку, только имеют два кожуха, и устанавливаются на общем фундаменте. Установка была введена в эксплуатацию весной 2007 года.

Более востребованными в Беларуси в силу климатических условий страны и специфики промышленных предприятий, большей частью тепло-технологических, могут стать абсорбционные тепловые насосы, предназначенные для получения горячей воды температурой до 90 °С для нужд отопления и ГВС.

На системы теплоснабжения в Беларуси приходится 40% всех потребляемых топливно-энергетических ресурсов. Расходуемая системами горячего водоснабжения энергия в конечном итоге также рассеивается в окружающей среде и, как принято считать, составляет до 30% энергии, необходимой системе теплоснабжения. Однако низкая температура таких источников не позволяет их прямое повторное использование.

Котельные занимают доминирующее место в системе теплоснабжения страны, причем многие являются производственно-отопительными. Рядом с ними в большинстве случаев располагаются предприятия, имеющие низкотемпературные потоки теплоты.

Уже сегодня частично налажено использование таких потоков. АБТН при сопряжении с котельными обеспечивают до 40 % экономии топлива. Соответственно очевидна экономия средств, т.к. топливная составляющая себестоимости отпускаемой котельной тепловой энергии высока и может достигать 90%.

### **Список использованных источников**

1. Алексеева, Т. А. Основы энергосбережения: учеб.-метод. комплекс для студентов специальностей 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС», 1-39 01 01 «Радиотехника» / Т.А. Алексеева. – Новополоцк: ПГУ, 2014. – 152 с.

2. Хрусталёв Б.М. Техническая термодинамика: Учебн. В 2-х ч., ч. 1. / Б.М. Хрусталёв, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк и др. – Мн.: УП «Техно-принт», 2004. – 487 с.

3. Application of customized absorption heat pumps for utilization of low-grade heat sources/Christian Keil [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 28. – P. 2070-2076.

4. Хрусталёв Б.М. К вопросу о развитии систем теплоснабжения в Беларуси / Б.М. Хрусталёв, В.Н. Романюк, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. – № 4-5. – 2014. – С. 2-7.

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ВЫХОДА БИОГАЗА**

*М.И. Валендюк, К.В. Прокопенко*

*Научный руководитель – И.Н. Прокопеня*

*Белорусский национальный технический университет*

В данной работе исследуется влияние ультразвука на органические вещества. *Цель работы:* выявить оптимальные параметры для ультразвука, которые способствуют наиболее эффективному воздействию на органические вещества.

Под воздействием ультразвука на клетки исходного субстрата происходит их разрушение. Разрушение частицы происходит при переходе порога кавитации. В водных суспензиях с небольшой концентрацией клеток этот порог составляет 0,2...0,3 Вт/см<sup>2</sup>, при частоте 1 МГц.

Самого факта появления пульсирующих газовых пузырьков в среде еще недостаточно для разрушения клеток. Эффект наблюдается, если амплитуда пульсаций пузырьков возрастает до определенной величины. Эта величина различна для разных клеток и зависит от их формы и размера, а также прочности цитоплазматической мембраны и наличия цитоскелета.

При высоких частотах ультразвукового воздействия на суспензию клеток механизмы разрушения также имеют механическую природу. Пороговая интенсивность ультразвука, вызывающая гибель клеток, зависит как от частоты ультразвука, так и от типа клеток. Например, порог разрушающего действия ультразвука для клеток одной из популяций элодеи равен 75 мВт/см<sup>2</sup> и находится в области 0,65 МГц, а для двух других популяций элодеи губительная для клеток минимальная интенсивность равно 180 мВт/см<sup>2</sup> (5 МГц).

Ультразвуковая дезинтеграция клеток получила широкое применение в биотехнологии, в биохимических и вирусологических исследованиях для выделения отдельных веществ или фрагментов клеток, а также в лабораторной диагностике для определения механической резистентности клеточных мембран.

Ультразвуковые процессы основаны на возникновении кавитационной эрозии, которая лежит в основе акустокапиллярного эффекта, обуславливающего высокую скорость смачивания капиллярных структур, помещенных в кавитирующую жидкость.

Кавитация сопровождается электрическими процессами и излучениями в ультразвуковой части спектра, что является одной из причин химического действия ультразвука. Химические процессы, протекающие в поле ультразвуковых волн, многообразны. Кавитация обуславливает возникновение практически всех химических реакций, наблюдаемых в подвергаемой обработке ультразвуком среде. Это связано не только с захлопыванием образующихся кавитационных полостей, но и способностью их к резонансным периодическим пульсациям. Кавитационный пузырек под

действием акустических колебаний зарождается в течение первого полупериода. При этом гидростатическое давление снижается и жидкость оказывается сильно растянутой. В следующий полупериод происходит сжатие возникшего пузырька. Если при таком сжатии не произойдет его полное захлопывание, то при определенных его размерах пузырек начинает пульсировать в такт с частотой акустических колебаний.

Рассмотрим некоторые факторы, влияющие на эффект ультразвуковой кавитации, и связанное с ней воздействие ультразвука на химические и физико-химические процессы.

*Действие растворенного газа.* В дегазированных жидкостях химические реакции под влиянием ультразвука не происходят, так как требуемые при этом звуковые давления не могут быть получены при помощи современных генераторов. Тот же эффект получается, если подвергнуть жидкость давлению до 1000 атм, мельчайшие газовые пузырьки приводятся в состояние истинного раствора, и их уже невозможно выделить из жидкости под действием ультразвука. Эти явления еще не получили достаточного объяснения, но неоспоримо, что наличие растворенной газообразной фазы в жидкости является необходимым для проявления эффекта кавитации.

*Частота.* При проведении физико-химических процессов под воздействием ультразвука правильный выбор частоты может играть решающую роль для достижения оптимальных результатов, в то время как на химические реакции изменение частоты колебаний влияет мало.

*Интенсивность.* Химические реакции в жидких средах не происходят при интенсивности ниже порога кавитации. Выше этого предела скорость реакции увеличивается более или менее пропорционально повышению ультразвуковой интенсивности. Хотя некоторые исследователи установили, что существует оптимальная интенсивность, которая совпадает с максимальным образованием пузырьков кавитации. С ее превышением число кавитационных пузырьков уменьшается.

*Длительность воздействия.* В большинстве физико-химических процессов максимальный эффект воздействия проявляется в первые 10-30 мин, увеличение продолжительности воздействия может вызвать обратное действие (например, эмульгирование и коагуляцию). Поэтому, в вопросе фактора длительности воздействия требуется индивидуальный подход к каждому отдельному процессу, так как определенных общих закономерностей еще не установлено.

*Внешнее давление.* Изменение статического давления оказывает сильное влияние на процесс кавитации. При исследовании течения химических реакций в ультразвуковом поле было выявлено, что как повышение давления, так и понижение его ниже атмосферного вызывает снижение эффекта воздействия и даже полное его прекращение.

*Температура.* Точно регулировать температуру жидкости, подвергающейся воздействию ультразвуковых волн, трудно, так как за счет поглощения ультразвуковой энергии выделяется значительное количество теп-

лоты. Оптимальной температурой физико-химических процессов, проводимых при воздействии ультразвука, считают 10÷30 °С. При продолжительном воздействии ультразвука и связанном с этим повышении температуры обрабатываемых веществ за счет поглощения ультразвуковой энергии требуется охлаждение растворов.

### Список использованных источников

1. Азарова А.Ю., Дулин В.М., Маркович Д.М., Первунин К.С. Влияние кавитации на турбулентные характеристики течений при обтекании тел // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2010. – №2. – С. 173-179.

2. Ультразвуковые процессы и аппараты в биологии и медицине. – [электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.uzo.matrixplus.ru/ultramedbio.htm> – Дата доступа: 15.10.2017.

УДК 620.9

## ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОГАЗА

*О.В. Василевский, С.Ю. Гончаров*

*Научный руководитель – И.Н. Прокопеня*

*Белорусский национальный технический университет*

Технология использования органических отходов для получения биогаза используется на практике последние 100 лет. Биогаз, который образуется в процессе анаэробного сбраживания органического субстрата, является альтернативой традиционному природному газу. И может использоваться для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (рис.1).



Рисунок 1 – Принципиальная схема получения тепловой и электрической энергии из биореактора с механическим перемешиванием

Сам по себе биогаз состоит из метана: 40-70%, диоксида углерода: 30-60%, и других газов, таких как водород: 1-5% и сероводород: 0-3%. Теплотворная способность биогаза составляет:  $6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$ , что соответствует половине литра дизельного топлива. Процесс получения биогаза можно разделить на 4 этапа: гидролиз полимеров, кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. Как и у других газов его характеристики представляют собой зависимость от температуры и давления. Важную роль в процессе образования биогаза играют: состав исходного сырья (наличие питательных веществ), влажность исходного сырья, время сбраживания, величина загрузки, кислотно-щелочной баланс (около 6,5), соотношение содержания углерода и азота (оптимум в диапазоне 10-15), отсутствие ингибиторов процесса, качественное перемешивание.

Как и при всех гетерогенных реакциях перемешивание играет важную роль. Предотвращая образование мертвых зон, расслоение осадка (отложение песка и образование корки на поверхности), уменьшение неоднородности температурного поля. При этом перемешивание должно обеспечить выравнивание концентраций метаболитов, образующихся в процессе брожения и являющиеся промежуточными субстратами для микроорганизмов или ингибиторами их жизнедеятельности, и поддержание необходимого контакта между ферментами и субстратами, разными группами бактерий. Однако энергия, которую можно затратить на осуществления процесса перемешивания не может быть бесконечной, а зависит от количества метана, получаемого в реакторе. В то же время твердый остаток процесса получения биогаза может быть использован в качестве удобрения. В целом можно выделить три способа перемешивания: механическое, гидравлическое и газом.

Механический способ представлен погружным лопастным перемешивателем, обычно используемым, в вертикальных биореакторах. Лопасты приводятся в движение электродвигателем с водонепроницаемой и коррозионностойкой оболочкой, охлаждение происходит за счет перемешиваемой среды. Другая разновидность это лопастной перемешиватель, имеющий оси, расположенные как горизонтально, так и вертикально или по диагонали. Двигатель располагается снаружи.

При газовом перемешивании используется биогаз, производимый в установке. Который под давлением выходит из сопел, расположенных, как правило, на дне реактора. Этот газ, поднимаясь, вызывает вертикальное движение, и тем самым перемешивая биомассу. Все силовое оборудование (насосы, компрессора) располагается снаружи. Используется данный метод лишь для перемешивания жидких стоков, в которых не образуется корка на поверхности. Так же необходимо исключить возможность попадания исходного сырья в газовую систему (например, путем установки клапанов).

В гидравлическом способе стоки насосами закачиваются в реактор, при этом вход и выход биомассы должен быть сделан таким образом, чтобы обеспечить максимальное перемешивание.

### Список использованных источников

1. Advanced in biogas technology. – [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/51799925> – Дата доступа: 03.07.2017.

2. Биогазовые установки. Практическое пособие. – [электронный ресурс]: – Режим доступа: [http://zorgbiogas.ru/biblioteka/biogas\\_book](http://zorgbiogas.ru/biblioteka/biogas_book). – Дата доступа: 03.04.2017.

УДК 338.27

## ПЛАНИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ENERGYPLAN

*Д.Б. Муслина, Т.А. Петровская*

*Белорусский Национальный Технический Университет*

**Введение.** Моделирование долгосрочных сценариев развития национальных энергетических систем и энергетики в целом актуально для всех стран без исключения. Однако, от того насколько обдуманно будут разработаны сценарии, взвешенно произведена оценка их рентабельности и осуществлен выбор дальнейшей долгосрочной энергетической стратегии, будет зависеть в целом дальнейшее развитие экономики государства. Это, в свою очередь носит крайне серьезный характер.

Осуществление технико-экономической оценки эффективности внедрения тех или иных инновационных технологий выработки энергии в будущем в масштабах страны с учетом графиков спроса на тепловую и электрическую энергии, и имеющихся уже в составе энергосистемы мощностей, крайне трудоемко. Для создания модели энергосистемы приходится идти на ряд допущений, которые порой могут привести к искажению результатов. Более того, на формирование подобной модели потребуется значительное количество времени и ресурсов.

Эта задача значительно упрощается при использовании такого инструмента моделирования развития энергосистемы, как EnergyPLAN. Основным назначением модели EnergyPLAN является разработка долгосрочных стратегий, призванных помочь руководству будущей местной, национальной, региональной или даже глобальной энергетической системы.

Планирование долгосрочных энергетических стратегий часто проводится с использованием комплексных подходов, которые учитывают, как наличие собственных энергоресурсов, так и роль энергоэффективности в снижении потребностей в импортируемом топливе.

Планирование энергетической стратегии традиционно играет важную роль в установлении структуры энергоисточников для регулирования в энергетическом секторе. В сфере ответственности планирования лежит выбор типов электростанций, которые будут построены, оценка возмож-

ной стоимости вырабатываемых вторичных энергоресурсов, учет тенденций в сфере цен на топливо и пр.

Поэтому при организации планирования в сфере энергетики должны учитываться результаты экономического развития страны, динамика потребления энергоресурсов промышленностью и населением, экологическая ситуация. Учет экологических последствий потребления и производства энергии приобрел в последние годы особую актуальность в странах ЕС и США в свете угрозы глобального изменения климата, обусловленной выбросами парниковых газов.

Например, многие страны ОЭСР и некоторые штаты США теперь при оценке эффективности регулирования своих энергетических систем прибегают к целевым показателям выбросов CO<sub>2</sub> и других парниковых газов. В свете этих событий широкое использование интегрированного энергетического планирования может становиться все более актуальным [1].

EnergyPLAN рассматривает три основных сектора любой национальной энергетической системы: теплоэнергетику, электроэнергетику и транспорт. Поскольку в последние годы в ряде европейских стран доля возобновляемой энергии на основе ветра, солнца, воды в энергобалансе становится все более заметной, обеспечение устойчивости и маневренности энергосистемы становится ключевой задачей. Для решения обозначенной задачи в модели EnergyPLAN доступны следующие варианты: интеграция комбинированных теплоэнергетических установок, тепловых насосов, ввод электрических транспортных средств, производство водородного топлива.

Важно отметить, что EnergyPLAN моделирует работу национальных энергетических систем на основе графиков часовых нагрузок энергосистемы по тепловой и электрической энергии с учетом выработки энергопотоков от различных энергоисточников, в том числе АЭС, КЭС, ТЭЦ, котельных и источников, установленных на промышленных предприятиях.

EnergyPLAN также позволяет моделировать стратегии со 100% снабжением электроэнергией от возобновляемых источников. Такая стратегия на сегодняшний день разработана и принята для энергетической системы Дании.

Аналогичные исследования, посвященные широкомасштабной интеграции ВИЭ, уже проводились европейскими учеными для энергетических систем Хорватии, Сербии, Финляндии при использовании инструмента моделирования EnergyPLAN. Результаты этих исследований указывают на способность энергосистемы принять и использовать более высокую долю различных видов ВИЭ.

**Описание модели EnergyPLAN.** EnergyPLAN разработан и исследовательской группой по устойчивому энергетическому планированию Ольборгского Университета (Дания). Модель используется многими исследователями, консультантами и политиками по всему миру благодаря тому, что основное внимание при разработке модели было направлено на ее общедоступность и удобство интерфейса, рис. 1-3.

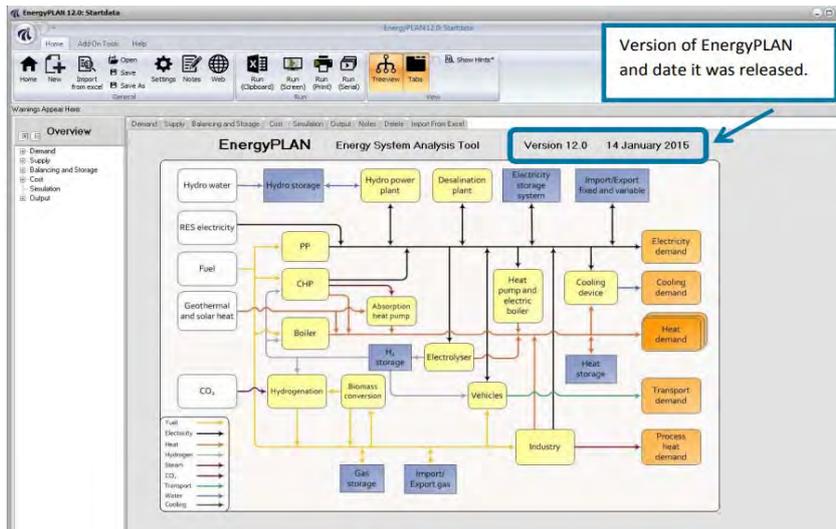


Рисунок 1 – Стартовая страница модели EnergyPLAN

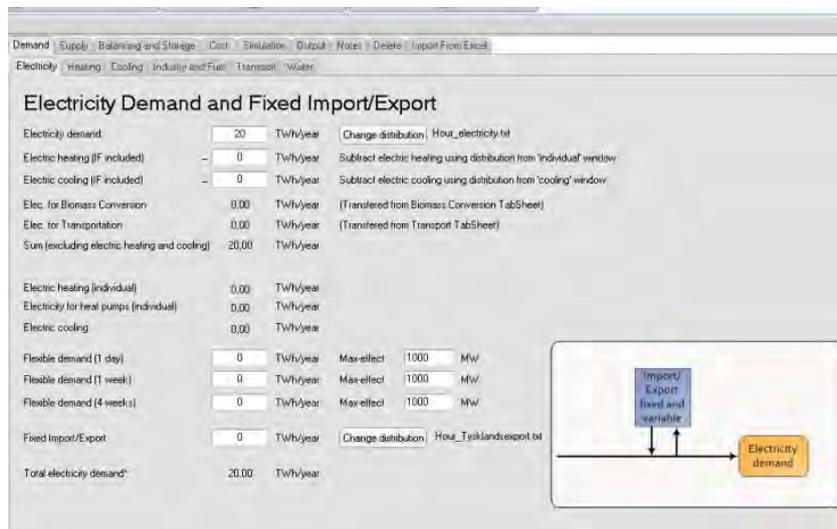


Рисунок 2 – Страница модели EnergyPLAN по введению данных по электропотреблению и импорту/экспорту электроэнергии



Рисунок 3 – Страница модели EnergyPLAN по введению данных по теплотреблению по видам потребителей

EnergyPLAN распространяется как бесплатное программное обеспечение. К нему имеется множество учебных материалов, руководство к использованию. Более того, существующие модели уже доступны для многих стран, а полученные с ее помощью результаты давно используются в множестве научных публикаций.

Для создания стратегий необходимо придерживаться определенной логики, основанной на структурированном процессе принятия решений на основе шести ключевых шагов, а именно:

1. изучение текущей ситуации и воссоздание существующей ситуации в модели EnergyPLAN;
2. проверка созданной модели на достоверность;
3. изучение потенциала страны по различным возобновляемым источникам энергии, таким как энергия солнца, ветра, приливов и отливов, биогазовые комплексы и установки на биомассе. Оценка потенциала промышленных и муниципальных ВЭРов, бытовых отходов и пр.;
4. разработка конкретных стратегий и возможностей, которые возможно реализовать в рамках процесса планирования устойчивой энергетики;
5. создание ряда моделей для прогнозирования вероятного воздействия различных сценариев с помощью инструмента EnergyPLAN, основанного на математическом моделировании;
6. анализ полученных результатов для выбора и обоснования наилучшей стратегии энергетического развития. Определение финансовых затрат, требуемых для реализации стратегии.

**Выводы.** Таким образом, EnergyPLAN – это удобный инструмент математического моделирования, который позволяет планировать устойчивое энергетическое развитие стран и регионов и наиболее подходит тем, кто намеревается развивать свою энергетическую безопасность, используя при этом в своих процессах планирования наилучшую доступную в мире практику.

УДК 629.735

## **КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ БЕЛАЭС**

*В.Н. Романюк, А.А. Бобич*

*Белорусский национальный технический университет*

Начиная с 2000 г. активно проводится модернизация генерирующих мощностей Белорусской энергосистемы. За это время к 2015 г. удельный расход условного топлива (УРТ) на выработку электрической энергии снизился на 14,3%, а УРТ на выработку тепловой энергии на 2,7%. Абсолютные величины УРТ, при этом, равны соответственно 235,5 г/кВт·ч и 167,5 кг/Гкал, а эксергетический КПД энергосистемы составил 33,1%, увеличившись в абсолютной величине на 3,7% или 12,6% в относительном выражении [1]. Вместе с тем, энергосистеме страны необходимо посто-

янное развитие, что не теряет актуальности с вводом в строй Белорусской АЭС в 2018–2020 гг.

Применение традиционных показателей для оценки энергетической эффективности сложных и многоукладных энергосистем при их модернизации и оптимизации не всегда позволяет принять однозначное решение. Что дает повод отдавать предпочтение в этих случаях индикативным показателям, который, по нашему мнению, могут быть получены только на базе безразмерных эксергетических характеристик. Наличие подобной индикативной оценки термодинамической эффективности, являющейся долговременной, стабильной характеристикой, позволит более обоснованно принимать решения по выбору варианта развития источников энергосистемы из ряда альтернативных решений, имеющих близкие экономические показатели, что часто имеет место при выборе системных решений [1].

С вводом Белорусской АЭС прогнозируются избытки мощности в период ночных провалов в отопительный и межотопительный периоды и приоритетным является строительство комплексов «электрокотел–тепловой аккумулятор», которое наиболее целесообразно реализовывать на малых ТЭЦ энергосистемы и котельных [2].

В работе [3] предложены перспективные технические мероприятия, позволяющие повысить эффективность энергосистемы путем внедрения на ТЭЦ абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН), тепловых аккумуляторов (ТА) и интеграции в состав ТЭЦ высоких начальных параметров ГТУ по сбросной схеме с основным оборудованием. Единовременное внедрение перечисленных мероприятий в полном объеме, при всей заманчивости такой реализации, по различным причинам оказывается невозможным. В этой связи очевидна необходимость оценки вклада в ожидаемый эффект (возможности резервирования, снижения расхода природного газа и пр.) того или иного из перечисленных мероприятий, а также определения количественной оценки эффективности энергосистемы с многоукладной структурой энергоисточников: КЭС, ТЭЦ, котельные на органическом топливе, АЭС на ядерном топливе, электрокотлы на ТЭЦ, электрокотельные, ГЭС, ветроэлектростанции. В [1, 5] показана целесообразность применения для принятия решения по выбору варианта развития системы термодинамического метода, и, в частности, на базе расчета термодинамического КПД для получения количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси на различных стадиях ее развития: от текущей ситуации, до интеграции в ее состав АЭС и дальнейшего совершенствования.

В 2020 г. после ввода двух блоков Белорусской АЭС ситуация с выработкой тепловой и электрической энергии на источниках энергосистемы изменится. При этом отпуск тепловой энергии сохранится. Это подтверждается тем, что за последние 15 лет отпуск тепловой энергии остается практически на одном уровне с колебаниями в пределах 5%. Прогнозируемая структура отпуска электроэнергии в 2020 году следующая:

АЭС – 48%, КЭС – 9%, ТЭЦ – 37%, избыток на электростанции – 6%. Для устранения избытков мощности генерации в период ночных провалов потребления электроэнергии, предусматривается строительство комплексов «электростанция–тепловой аккумулятор» суммарной мощностью до 1,2 ГВт в том числе 0,5 ГВт на ТЭЦ, 0,5 ГВт – на котельных и 0,2 ГВт – на промышленных предприятиях.

Результаты количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси после ввода в строй АЭС и электростанций и сравнение их с данными по существующему положению в энергосистеме указывают на снижение ее термодинамической эффективности от 2,3% в отопительный период до 3,2% в межотопительный период, рис. 1.



Рисунок 1 – Сравнение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в 2015 и в 2020 году при работе Белорусской АЭС и электростанций

**Изменение термодинамической эффективности энергосистемы в связи с совершенствованием комбинированных источников энергосистемы.** Как уже отмечалось, совершенствование генерирующих источников энергосистемы не может быть остановлено. Некоторые из возможных энергосберегающих мероприятий приведены в [2]. Рассмотрим изменение эксергетического КПД энергосистемы в результате внедрения этих мероприятий.

*Установка АБТН на ТЭЦ.* АБТН на ТЭЦ следует использовать для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, что при сохранении отпуска необходимого количества тепловой энергии обеспечивает снижение и расхода природного газа на ТЭЦ, и электрической мощности ТЭЦ. Суммарная тепловая мощность АБТН на всех ТЭЦ энергосистемы Беларуси в условиях 2020 г. оценивается величиной до 0,44 ГВт. В межотопительный период АБТН не используются, поскольку ТЭЦ работают практически на техническом минимуме нагрузки. В отопительный период во время ночного провала электропотребления АБТН также не работают по той же причине разгрузки ТЭЦ до технического минимума.

Использование АБТН в описанном качестве позволяет ТЭЦ изменять генерацию электроэнергии в сторону увеличения или уменьшения электрической мощности при сохранении тепловых нагрузок. Это обстоятельство способствует работе основных регуляторов, поскольку может быть изменен

в нужную сторону диапазон регулирования, возлагаемый на них. Использование АБТН на ТЭЦ позволяет изменять указанную генерацию электроэнергии по энергосистеме в целом до 0,15 ГВт в отопительный период. При этом средневзвешенный УРТ на отпуск электроэнергии в отопительный период по всем ТЭЦ снижается на 13 г/(кВт·ч) с снижением потребления природного газа в энергосистеме до 0,11 млн тонн условного топлива в год.

Введение в состав ТЭЦ АБТН приводит к тому, что в дневное время отопительного периода избыток генерации электроэнергии сокращается и исключается использование электродкотлов в этот период.

Результаты расчетов количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси после внедрения АБТН суммарной тепловой мощностью 0,44 ГВт ТЭЦ после 2020 г. приведены на рис. 2.



Рисунок 2 – Сравнение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в 2020 г. при работе АЭС и электродкотлов и тоже с АБТН на ТЭЦ

Использование АБТН на крупных ТЭЦ позволяет увеличить эксергетический КПД энергосистемы на 0,35% в отопительный период и на 0,23% в среднем за год с соответствующим снижением потребления природного газа.

*Установка ГТУ по сбросной схеме на ТЭЦ.* Суммарная возможная электрическая мощность ГТУ по сбросной схеме на всех ТЭЦ энергосистемы Беларуси составляет до 0,6 ГВт. В отопительный и межотопительный периоды во время ночного провала электропотребления ГТУ по сбросной схеме допускают снижение мощности до 0,3 ГВт. Важно отметить, что требуются ГТУ единичной мощностью до 45 МВт, т.е. промышленных типоразмеров, которые практически не снижают моторесурс при указанных нагрузках.

Средневзвешенный УРТ на отпуск электроэнергии в межотопительный период по всем ТЭЦ снижается во время дневного пика и ночного провала электропотребления на 36 г/(кВт·ч). В отопительный период соответственно снижение УРТ составляет 10–11 г/(кВт·ч). В результате внедрения ГТУ по сбросной схеме на крупных ТЭЦ энергосистемы достигается интегральное годовое снижение потребления природного газа до 0,62 млн т у.т.

Количественная оценка термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси в результате внедрения ГТУ по сбросной схеме на ТЭЦ по отношению к ситуации в 2020 г. приведена на рис. 3.

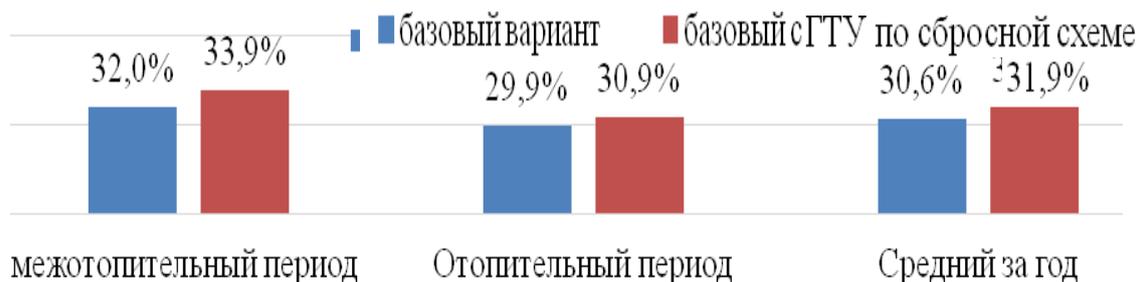


Рисунок 3 – Сравнение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в 2020 г. при работе АЭС и электродкотлов и с ГТУ по сбросной схеме на ТЭЦ

Эксергетический КПД энергосистемы в результате установки на ТЭЦ энергосистемы ГТУ по сбросной схеме возрастает на 1,9% в межотопительный период, на 1,0% в отопительный период и на 1,3% в среднем за год.

Обобщение результатов: среди различных вариантов наиболее эффективным является комбинация АБТН суммарной тепловой мощностью 0,44 ГВт и ГТУ по сбросной схеме суммарной электрической мощностью 0,6 ГВт. В отопительный период, средневзвешенный УРТ на отпуск электроэнергии во время дневного пика электропотребления уменьшается на 23 г/(кВт·ч), в часы ночных провалов имеет место снижение УРТ на 10 г/(кВт·ч). В результате внедрения АБТН и ГТУ по сбросной схеме на ТЭЦ энергосистемы достигается годовое снижение потребления природного газа до 0,74 млн т у.т.



Рисунок 4 – Сравнение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в 2020 г. при работе Белорусской АЭС и электродкотлов и тоже с АБТН и ГТУ по сбросной схеме на ТЭЦ

Повышение эксергетического КПД энергосистемы Беларуси в этом варианте составляет от 1,4 до 1,9%, рис. 4.

Выводы: Термодинамическая эффективность энергосистемы может быть дополнительным объективным и стабильным показателем при принятии соответствующих решений внедрения энергосберегающих мероприятий.

Ввод АЭС снижает потребление природного газа до 4,2 млн т у.т. и, при этом, что ожидаемо, ухудшается термодинамическая эффективность энергосистемы с 33,1 до 30,6%. Реализация комплекса мероприятий, предложенных в работе, обеспечивает дополнительно после ввода в строй АЭС уменьшение потребления природного газа до 0,74 млн т у.т. в год, что,

в конечном итоге, увеличивает термодинамическую эффективность энергосистемы до 32,2%.

#### **Список использованных источников**

1. Романюк, В.Н. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, В.А. Седнин, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 6. – С. 2–7.
2. Разработка мероприятий по режимной интеграции Белорусской АЭС в баланс энергосистемы: отчет о НИР/ Науч.-исслед. и проект. Республ. Унитарн. Предпр. «Белорусский теплоэнергетич. ин-т»; рук. работы Ф.И. Молочко. – Минск, 2014. – 96 с. – № Б-14-7/1.
3. Романюк, В.Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 6. – С. 3–8.
4. Андрущенко, А.И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А.И. Андрущенко // Материалы четвертой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 24–25 апреля 2003 г. / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2003. – С. 12–14.
5. Романюк, В.Н. Комплекс мероприятий по повышению эффективности ТЭЦ энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергоэффективность. – 2012. – июнь. – С. 30–31.
6. Романюк, В.Н. Выбор схем парогазовых установок при модернизации паротурбинных ТЭЦ / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая. // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 3. – С. 11–15.
7. Романюк, В.Н. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 4. – С. 31–43.
8. Романюк, В.Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент, 2016. – №4. – С. 2–9.

УДК 697.343

### **РЕГЕНЕРАТИВНО-УТИЛИЗАЦИОННОЕ ТЕПЛОИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НЕПРОХОДНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛОТРАСС**

*В.А. Седнин, Т.В. Бубырь*

*Белорусский Национальный Технический Университет*

Одним из основных доводов противников централизованного тепло-снабжения является ссылка на необходимость в тепловых сетях для транс-

порта тепловой энергии на большое расстояние со значительными технологическими потерями теплоты. Безусловно, прокладка тепловых сетей требует дополнительных капитальных затрат, а тепловые потери при транспорте тепловой энергии требуют дополнительных затрат на топливо, и совместно оба этих фактора – влияют как на энергоэффективность системы теплоснабжения в целом, так и на тариф отпускаемой энергии. И хотя эти недостатки перекрываются соответствующими преимуществами централизованного теплоснабжения [1-3], тем не менее, решение проблемы минимизации тепловых потерь в системах централизованного теплоснабжения всегда была важной и экономически оправданной.

Одним из основных подходов решения этой проблемы в настоящее время является применения новых конструктивов для тепловых сетей, в частности, с применением предизолированных теплопроводов заводской готовности [4]. Однако, несмотря на современную тенденцию применения бесканальной прокладки предизолированных теплопроводов, в существующих системах централизованного теплоснабжения теплотрассы, проложенные в непроходных каналах, имеют достаточно большой удельный вес. Учитывая высокую стоимость изготовления и прокладки теплопроводов, их полная замена с применением инновационных технологий займет еще не одно десятилетие. В этой связи остается актуальными разработка и исследование технологий повышения энергоэффективности эксплуатации существующих теплопроводов, проложенных в непроходных каналах.

Следует отметить, что в качестве теплоизоляционного материала теплопроводов в непроходных каналах, большей частью, используется минеральная вата, имеющая коэффициент теплопроводности  $0,044 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , несколько больше, чем у пенополиуретановой изоляции  $0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Но рассеивание теплоты существующими теплопроводами оценивается до 13% и выше, что превышает норматив на 4% и более, и в 1,5...2 раза превышает эту характеристику для теплотрасс с ПИ-трубами [4]. В большой степени такая ситуация связана с утратой теплоизоляционных свойств минеральной ваты в связи с ее увлажнением в процессе эксплуатации теплопроводов, проложенных в непроходных каналах. Одним из способов борьбы с увлажнением изоляции является устройство естественной приточно-вытяжной вентиляции, призванной обеспечить удаление влаги из атмосферной части канала. Тем не менее, подобное решение не всегда возможно и не во всех случаях решает задачу удаления влаги из канала. Кроме того, проточная вентиляция каналов может приводит к увеличению тепловых потерь.

В работе [5] представлены результаты исследования в рамках технического решения по использованию непроходных каналов для транспорта вентиляционных выбросов промышленных предприятий на теплоэлектроцентраль для их использования в качестве окислителя в котлах. Показана возможность перемещения по непроходным каналам заметных расходов воздуха (до 50 тыс.  $\text{м}^3/\text{час}$ ), на достаточно большие расстояния (до 1 км).

Техническая схема реализации регенеративно-утилизационной системы теплоиспользования в тепловых сетях с прокладкой трубопроводов в непроходных каналах. На теплоисточнике или центральном тепловом пункте (ЦТП) устанавливается вентиляционная теплонасосная воздушная установка, представляющая собой комбинацию газодувки (вентилятора) и компрессионного теплового насоса типа «воздух-вода» (ВТНУ) [6], обеспечивающий, во-первых, прокачку наружного воздуха через непроходной канал сопряженного участка теплотрассы, во-вторых, требуемую степень трансформацию теплоты, поступающей с этим воздухом. Это позволяет использовать полученные потоки теплоты для нужд теплоснабжения. Таким образом, воздух через специально устроенные воздухозаборники направляется в каналы тепловых сетей, проходя через которые нагревается, и далее поступает в теплообменный аппарат ВТНУ (испаритель или промежуточный теплообменник), и далее охлажденный воздух возвращается в атмосферу.

Следует отметить, привлекательность подобного решения, прежде всего, в отношении использования теплоты грунта. В штатном подходе к утилизации теплоты грунта требуется обустройство поля скважин горизонтальных или вертикальных, что и затратно, и достаточно требовательно в эксплуатации [6]. В условиях городской застройки, с учетом стоимости участков земли использование грунтовых ТНУ практически невозможно. В то же время, непроходные каналы можно рассматривать как готовую систему горизонтально-расположенную канальную систему для утилизации теплоты грунта, что расширяет положительные стороны полезности применения непроходных каналов для прокладки теплопроводов.

Предварительный анализ энергоэффективности регенеративно-утилизационной системы теплоиспользования в тепловых сетях с прокладкой трубопроводов в непроходных каналах. Для определения эффективности предложенной системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплопроводов в непроходных каналах требуется решить комплекс задач. Первоочередными среди них являются определение величины и структуры потока теплоты нагрева воздуха при прохождении через участок канала, а также требуемого напора вентилятора, который должен быть побуждающим устройством для прокачки воздуха по каналу.

Теплопритоки к воздуху, проходящему по каналу, определяются комплексом факторов, среди которых наиболее значимыми являются длина канала, скорость воздуха в нем, характерный размер канала, температурный напор теплопередачи от сетевой воды к воздуху канала, характеристики тепловой изоляции. При этом, требуется выполнять очевидное ограничение: для исключения рассеяния тепловой энергии в грунт, температура воздуха в канале не должна превысить температуру грунта вокруг канала. Здесь же следует указать и другое ограничение: необходимо, чтобы последующее охлаждение прокачиваемого воздуха происходило до значения температуры не превышающего температуру наружного воздуха, который

поступает в канал из окружающей среды в данный период времени. Что обеспечивает полное использование теплоты, затраченной на нагрев наружного воздуха при его нахождении в канале.

В качестве критерия эффективности на первом этапе исследования можно принять экономию первичного энергоресурса (топлива) в системе централизованного теплоснабжения или отдельном сетевом районе.

Структура теплового потока, затраченного на нагрев воздуха, может быть определена балансовым методом путем суммирования: теплотеря от прямого и обратного теплопровода (охлаждения прямой и обратной сетевой воды) на участке, теплоотвода от грунта через стенки канала. В первом приближении, для оценки величины потоков утилизации теплоты грунта и теплоты рассеяния теплопроводами в канале можно ориентироваться на расчетную величину теплотеря в теплотрассах систем централизованного теплоснабжения [5]. Однако задача расчета тепловых потерь сама по себе достаточно сложная и окончательно до сих пор не решена [7]. В этой связи целесообразно для решения задачи нагрева воздушного потока в канале теплотрассы целесообразно прибегнуть к численным методам моделирования с использованием стандартных прикладных пакетов, в частности, программный комплекс ANSYS [8, 9]. В этом случае можно говорить о приемлемости полученных результатов для адаптации и обобщения с целью применения в проектной практике.

Анализируя рассмотренную ситуацию можно констатировать целесообразность проведения исследований использования теплоты охлаждения воздуха, в течение как отопительного, так и межотопительного периодов времени с определением минимальной температуры охлаждения воздуха по выбранной целевой функции для того или иного числа часов стояния наружных температур той или иной градации.

Несмотря на определенную техническую гипотетичность решаемой задачи, в целом исследования в данном направлении преследует цель создания инновационных конструктивов теплопроводов с «активной» теплоизоляцией, т.е. создания теплопроводов с нулевой плотностью теплового потока на границе с окружающей средой.

**Выводы.** Искусственная вентиляция непроходных каналов теплотрасс может наряду с поддержанием проектных характеристик минераловатной изоляции трубопроводов обеспечить возможность повышения энергоэффективности систем теплоснабжения путем регенерации и утилизации низкотемпературных тепловых потоков от теплопроводов, грунта и наружного воздуха с последующей трансформацией их потенциала до уровня, допустимого к использованию в системах теплоснабжения. Для организации регенеративно-утилизационной схемы теплоиспользования в непроходных каналах тепловых сетей предлагается использовать в тепловых пунктах вентиляционные компрессионные теплонасосные установки.

Для разработки методики расчета и проектирования регенеративно-утилизационной схемы теплоиспользования в непроходных каналах тепло-

вых сетей планируется проведение исследования процессов тепломассобмена методом численного моделирования. Предполагается, что полученные результаты исследования позволят также предложить новые конструктивы теплопроводов с «активной» теплоизоляцией.

#### **Список использованных источников**

1. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2002. – С.448.
2. Зингер Н.М., Белевич А.И. Развитие теплофикации в России // Электрические станции. – 1999. – № 10. – С. 2–8.
3. Седнин В.А. Теория и практика создания автоматизированных систем управления теплоснабжением. – Минск: Изд-во БНТУ, 2005. – 192 с.
4. Копко В.М. Теплоснабжение / В.М. Копко. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 336 с.
5. Марченко А.В. Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.14.04 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты; 05.14.05 – Промышленная теплоэнергетика / А.В. Марченко. – Ульяновск, 2008. – 175 с.
6. Амерханов, Р.А. Тепловые насосы / Р.А. Амерханов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 160 с.
7. Тарасевич, Е.И. Численное моделирование теплообмена для двухтрубных тепловых сетей при подземной канальной и бесканальной прокладке / Е.И. Тарасевич. – Фундаментальные исследования. – 2015. – №2 (часть 22) – С. 4880-4885.
8. Бруяко, В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруяко, В.Г. Фокин, Е.А. Соядусов и др. / Самара: Самар. Госуд. Техн. Ун-т, 2010. – 271 с.
9. Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова, Издательство: ДМК Пресс. – 2017. – 210 с.

УДК 621.181

### **АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

*В.А. Седнин, А.А. Абрамовский*

*Белорусский национальный технический университет*

Энергетическая целесообразность создания комбинированных энерго-технологических установок (КЭТУ) на базе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций магистрального газопровода была обоснована в работах [1-5]. В ходе исследования были синтезированы несколько

технологических схем КЭТУ. Одним из перспективных вариантов для реализации можно считать КЭТУ в составе ГПА, теплофикационной паросиловой установки (ТПСУ) и абсорбционной холодильной машины (АБХМ) для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ (рис. 1).

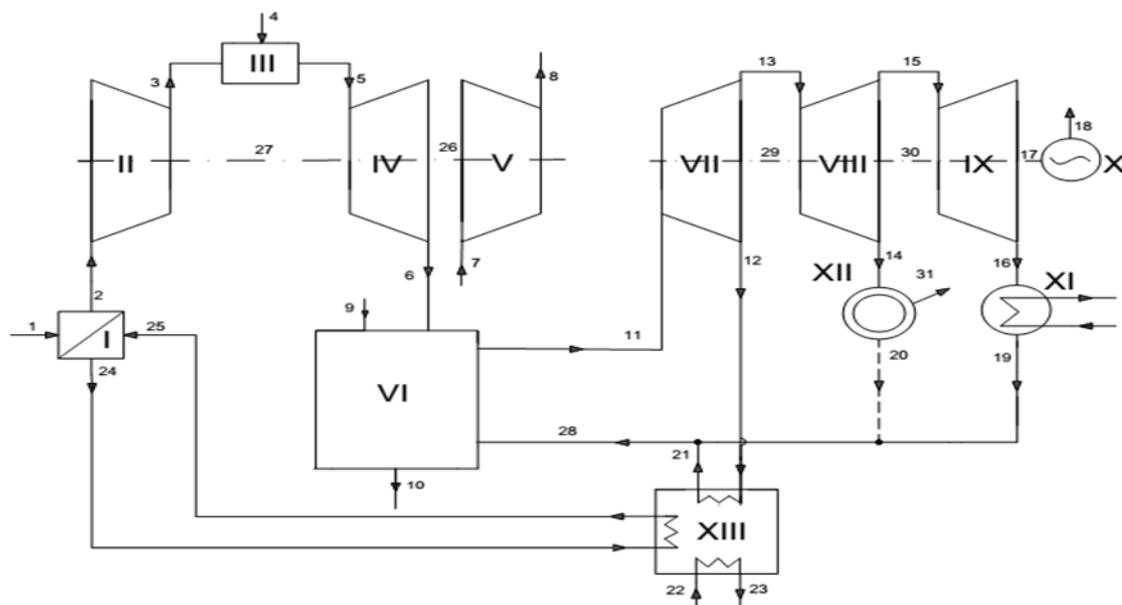


Рисунок 1 – Принципиальная схема комбинированной энерготехнологической установки в составе ГПА и ПСУ: I – теплообменный аппарат; II – компрессор; III – камера сгорания; IV – газовая турбина; V – нагнетатель; VI – котел-утилизатор; VII, VIII, IX – ступени паровой турбины; X – генератор; XI – конденсатор; XII – потребитель тепловой энергии; XIII – абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 – воздух; 5, 6, 10 – продукты сгорания; 4, 7, 8, 9 – природный газ; 11, 12, 13, 14, 15, 16 – пар; 19, 20, 21, 28 – конденсат; 24, 25 – вода холодного контура АБХМ; 22, 23 – вода из контура обратного водоснабжения компрессорной станции; 17, 26, 27, 29, 30 – механическая энергия; 31 – тепловая энергия; 18 – электрическая энергия

Продукты сгорания после газовой турбины IV поступают в котел-утилизатор VI, где генерируется перегретый пар, для привода паровой турбины. Пар после первой ступени турбины направляется к АБХМ для получения холодной воды, а после второй ступени на технологические нужды энергопотребителя. Холодная вода из АБХМ направляется в теплообменный аппарат для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор газотурбинного двигателя.

Для параметрической оптимизации была разработана математическая модель макроуровня [5]. В продолжение исследования вышеуказанная математическая модель была применена для получения регрессионных зависимостей. Численный эксперимент проводился с применением математического аппарата регрессионного анализа теории планирования эксперимента [6...8]. При этом рассматривается зависимость критерия оптимизации (от-

клика) от величины управляемых параметров (факторов), модель объекта исследования в общем виде:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (1)$$

где  $y$  – критерий оптимизации;  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – факторы, которые варьируются при проведении эксперимента.

В качестве критериев оптимизации принимались электрическая мощность и КПД КЭТУ, в качестве факторов – температура воздуха, подаваемого в компрессор двигателя, степень сжатия в компрессоре двигателя и расход пара на технологию.

Общий вид зависимостей

$$N_{18} = f(t_2, \beta_k, G_{14}); \quad (2)$$

$$\eta_{\text{КЭТУ}} = f(t_2, \beta_k, G_{14}), \quad (3)$$

где  $N_{18}$  – электрическая мощность ПСУ, кВт;  $t_2$  – температура воздуха, подаваемого в компрессор двигателя, °C;  $\beta_k$  – степень сжатия в компрессоре двигателя;  $G_{14}$  – технологический расход пара, кг/с.

В результате обработки полученных данных, с учетом исключения статистически незначимых коэффициентов зависимости (2) и (3) приняли вид

$$y(N_{18}) = 1,78 \cdot 10^4 + 0,60 \cdot 10^3 x_1 - 1,06 \cdot 10^3 x_2 - 0,69 \cdot 10^3 x_3 - 6,2 x_1 x_2 + 23,6 x_1^2 + 75 x_2^2 + 6,8 x_3^2.$$

$$y(\eta_{\text{КЭТУ}}) = 37,2 + 0,271 x_1 - 0,480 x_2 - 0,320 x_3 + 0,0211 x_1^2 + 0,0441 x_2^2 + 0,0130 x_3^2.$$

Оценка адекватности полученной регрессии показала, что полученная зависимость пригодна для использования с доверительной вероятностью не менее 95 %.

Переход к именованным величинам позволил уравнения (2) и (3) представить в виде:

$$N_{18} = 5,03 \cdot 10^4 + 75 t_2 - 3,29 \cdot 10^3 \beta_k - 369 G_{14} - 0,75 t_2 \beta_k + 0,37 t_2^2 + 75 \beta_k^2 + 1,69 G_{14}^2.$$

$$\eta = 55 + 3,01 \cdot 10^{-2} t_2 - 1,81 \beta_k - 20,1 \cdot 10^{-2} G_{14} + 3,25 \cdot 10^{-4} t_2^2 + 4,51 \cdot 10^{-2} \beta_k^2 + 3,01 \cdot 10^{-3} G_{14}^2.$$

Оптимальные значения управляемых параметров для максимальной электрической мощности  $N_{13}^{\text{max}} = 20,3$  МВт в исследованной области составили

$$t_2 = 23 \text{ } ^\circ\text{C}, \beta_k = 14, G_{14} = 4 \text{ кг/с, при этом } \eta_{\text{КЭТУ}} = 38,4\%.$$

### Список использованных источников

1. Несенчук А.П. Влияние теплоутилизационного «хвоста» компрессорной станции на эффективность работы газотурбинного привода с изобарным подводом теплоты и регенеративным теплоиспользованием / А.П. Несенчук [и др.] // Известия вузов. Энергетика. – 2013. – № 4. – С.37-46.
2. Несенчук А.П. Энергоснабжение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счет утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А.П. Несенчук, А.А. Абразовский // Известия вузов. Энергетика. – 2013. – № 6. – С.32-36.
3. Абразовский А.А. Влияние технологических параметров магистрального газопровода на показатели работы компрессорной станции / А.А. Абразовский // Известия вузов. Энергетика. – 2014. – № 3. – С.27-32.
4. Абразовский А.А. Влияние утилизационной нагрузки привода компрессорной станции на параметры работы ГТУ / А.А. Абразовский // Известия вузов. Энергетика. – 2014. – № 4. – С.24-29.
5. Седнин В.А. Применение паросиловой установки для повышения энергоэффективности работы газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абразовский // Энергия и менеджмент. – 2016. – №2. – С.16–19.
6. Нинул А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента / А.С. Нинул – М.: Издательство физико-математической литературы, 2009. – 336 с.
7. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В.Б. Тихомиров – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
8. Шестаков В.Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов: учеб. пособие / В.Н. Шестаков. – Омск: СибАДИ, 2007. – 95 с.

УДК 621.311

### ИССЛЕДОВАНИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ ПО ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*А.И. Минибаев, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, А.Р. Мамлеева  
Казанский государственный энергетический университет,  
Российская Федерация*

Тепловые электрические станции (ТЭС) являются одним из основных источников высокоминерализованных стоков, оказывающих негативное влияние на экологию водных систем региона. Ядром высокоминерализованных стоков на ТЭС являются водоподготовительные установки (ВПУ), прежде всего установки ионитного обессоливания. В настоящее время на большинстве ТЭС кислые высокоминерализованные стоки с катионитовых фильтров и щелочные высокоминерализованные стоки с анионитовых

фильтров ВПУ взаимно нейтрализуют и конечный высокоминерализованный сток сбрасывают.

Практикуемый в ряде стран способ утилизации высокоминерализованных стоков упариванием с захоронением твердых солей нельзя назвать удачными, так как при этом способе безвозвратно теряются все ценные химические компоненты стоков [1].

В решении проблемы представляет интерес использование электродиализного концентрирования стоков, до их нейтрализации до уровня, пригодного для повторного использования в цикле ТЭС. При этом особый интерес представляют щелочные стоки ВПУ, поскольку они не содержат ионов жесткости, а сама щелочь – дорогостоящий реагент [2].

Процесс электродиализного концентрирования достаточно хорошо изучен, поэтому задачи работы включали проверку работоспособности с использованием перспективных электромембранных аппаратов и мембран. В качестве электромембранных аппаратов использовали аппараты линейки ЭМА производства JSC «Membranes Technologies LT» отличающихся надежностью работы в концентрированных растворах при высокой токовой нагрузке. В качестве мембран использовали ионселективные катионо- и анионообменные мембраны IONSEP-НС/МС предназначенные для работы со сточными водами.

Поток соли через мембранную пару ( $j_s$ ) при проведении экспериментов определяли двумя методиками [3, 4, 5].

По первому методу потоки определяли по изменению концентрации соли в циркуляционных накопительных емкостях ( $\Delta c_d$  – для емкости диализата,  $\Delta c_k$  – для емкости концентрата):

$$j_s = \frac{\Delta c_d \cdot V_d}{s \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $V_d$  – объем емкости диализата.

По второму методу поток определяется по изменению концентрации соли внутри аппаратов между входом и выходом:

$$j_s = \frac{\Delta c'_d \cdot v}{s \cdot \tau}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость потока,  $\frac{m^3}{c}$ .

$$\frac{j_s}{\Delta c} = -P_s + \frac{\eta}{F} \cdot \frac{i}{\Delta c'} \quad (3)$$

где  $\Delta c$  – градиент концентрации между концентратом и дилюатом,  $\frac{m}{m^2 \cdot c}$ ;

$P_s$  – коэффициент диффузионной и осмотической проницаемости соли,  $\frac{m}{c}$ .

$\eta$  – выход по току,  $\frac{mоль}{F}$ .

Полученные экспериментальные результаты обрабатывались в рамках модели электродиализного концентрирования. Согласно модели, поток соли и воды через мембрану складываются из диффузии осмотических и электромембранных потоков:

$$j_s = -P_s(c_k - c_d) + \eta \frac{1}{F}$$

$$j_w = P_w(c_k - c_d) + t_w \frac{1}{F}$$

где  $j_w$  и  $j_s$  – соответственно потоки соли и воды в камеры концентрирования;

$P_s = P_s^a + P_s^k$ ,  $P_w = P_w^a + P_w^k$  – диффузионная и осмотическая проницаемость мембранной пары соответственно;

$t_w = t_w^a + t_w^k$  – число переноса воды через мембранную пару;

$\eta = 1 - t_+^a - t_-^k$  – выход по току для переноса катионов (к) и анионов (а);

$c_k$  и  $c_d$  – концентрация соли в камерах концентрирования и обессоливания, соответственно.

В модели предполагалось, что в концентрированных растворах электроосмотический перенос свободной воды пренебрежимо мал (вода переносится преимущественно в составе гидратных оболочек ионов). Поэтому число переноса воды представлялось в виде  $t_w = t_w^a + t_w^k = h\eta$ , где  $h$  – число гидратации соли. В этом приближении уравнение для потока воды можно записать в виде:

$$j_w = P_w(c_k - c_d) + h\eta \frac{1}{F}$$

Все четыре феноменологических параметра модели:  $P_s$ ,  $P_w$ ,  $\eta$  и  $h$  можно определить путем линеаризации уравнений (2) и (3), делением их правых и левых частей на  $(c_k - c_d) = \Delta c$ :

$$\frac{j_s}{\Delta c} = -P_s(c_k - c_d) + \frac{\eta}{F} \frac{1}{\Delta c}$$

$$\frac{j_w}{\Delta c} = P_w(c_k - c_d) + \frac{t_w}{F} \frac{1}{\Delta c}$$

Экспериментальные данные с использованием метода наименьших квадратов обрабатывали в координатах  $\frac{j_s}{\Delta c} - \frac{1}{\Delta c}$  и  $\frac{j_w}{\Delta c} - \frac{1}{\Delta c}$  для определения транспортных характеристик мембранной пары. На рис. 1–3 представлены результаты проведенных экспериментов.

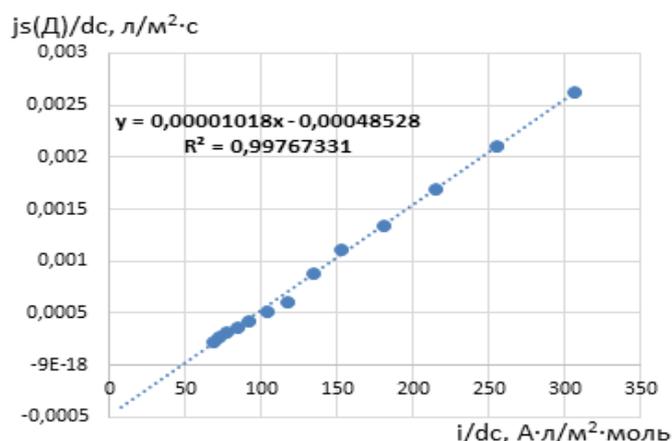


Рисунок 1 – Зависимость потока соли через мембранную пару от плотности тока

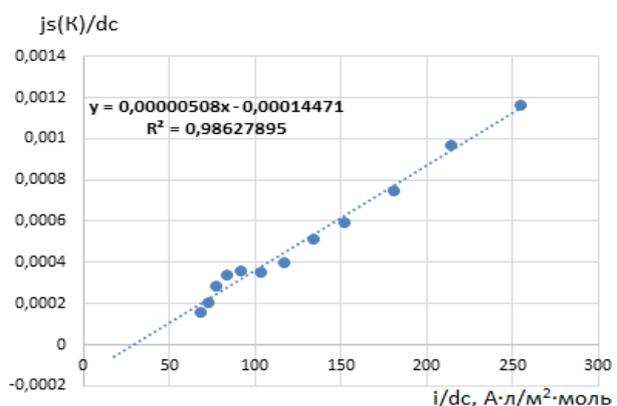


Рисунок 2 – Поток соли из концентрата

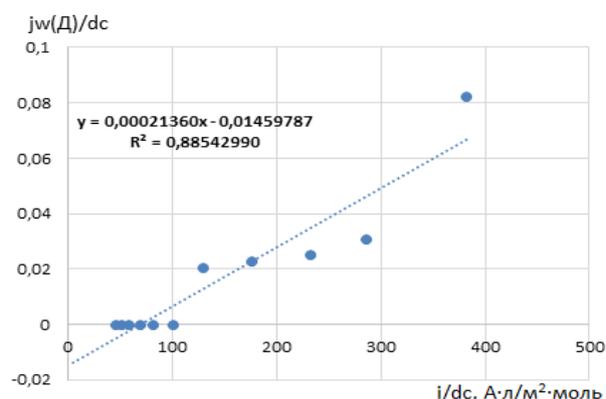


Рисунок 3 – Поток воды из дилюата

Таблица 1

Характеристики массообменных процессов при концентрировании модельных растворов на каскаде из двух ЭМА

N	$\vartheta_{д}$ , л/ч	$\vartheta_{к}$ , л/ч	$P_s$ (д), кг/м <sup>2</sup> ·ч	$\eta_s$ (д)	$P_w$ , л/м <sup>2</sup> ·ч	$\eta_w$ (д)	h, моль/моль	$\frac{\Delta M_{д}}{\Delta M_{с}}$ , моль/моль
1	2000	2000	1,40	0,907	25,38	8,45		6,4
2	6000	6000	1,595	0,704		3,5		17,8
3	4000	4000	0,91	0,75		9,65		17,5
4	3000	3000	0,67 0,936 (к)	0,59 0,715 (к)	17,9	10,61	14,84	14,2
5	5000	5000	0,72 1,47 (к)	0,675 0,75 (к)		≈ 9,16	12,2 (к)	18,2
6	1000	1000	1,44	0,933	14,9	5,45	5,84	12,9
7	2000	1000	1,44	1,022	52,56	20,61	20,2	19,2
8	1000	600	0,03	0,982	55,44	14,57	14,8	11,2

В таблице 1 приведены результаты работы каскада двух аппаратов ЭМА-400/2 при концентрировании модельного раствора хлорида натрия.

Масса перешедшей соли из диализата в концентрат:

$$\frac{(C_{с,д}^1 - C_{с,д}^2)}{1000} \cdot V_{д, кг},$$

$$j_s = \frac{\Delta C_{с,д} \cdot V}{S \cdot \tau}, \frac{кг}{с}.$$

Эффективность процесса:

$$\frac{V_{д} \cdot (C^{1д} - C^{2д})}{57,5 \cdot (Q_1 + Q_2)}, \frac{МОЛЬ}{F},$$

где  $Q_1 = \frac{(I_1 + I_2) \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{26,8} \cdot n_1$ , а  $n_1$  – число камер по I тракту, 200 шт.

Поток соли через мембранную пару:

$$j_s = \frac{\Delta C_{с,д} \cdot V_{д}}{\Delta \tau \cdot 57,5 \frac{г}{МОЛЬ} \cdot 3600 с \cdot 0,08 м^2 \cdot 15' м^2 \cdot с} \frac{МОЛЬ}{м^2 \cdot с}$$

Градиент:

$$\Delta C_{к/д} = \frac{C_{к/ср} - C_{д/ср}}{\frac{C_{к1} + C_{к2}}{2} - \frac{C_{д1} + C_{д2}}{2}}$$

Перенос воды:

$$I_w = \frac{\Delta M_{w,г}}{\Delta \tau \cdot 18 \frac{г}{МОЛЬ} \cdot 3600 \frac{с}{час} \cdot 0,08 м^2 \cdot 15' м^2 \cdot с} \frac{МОЛЬ}{м^2 \cdot с}$$

В ходе данной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования массообменных процессов, протекающих при регенерации ионоселективных анионо- и катионообменных мембран высокоминерализованными растворами сложного состава.

Получены зависимости влияния потока соли через мембранную пару в зависимости от плотности тока. Данные исследования затрагивали поток воды из дилуата и поток соли из концентрата.

Данные исследования позволили выявить закономерности электро-мембранной переработки вод с различной степенью минерализации. Полученные результаты были учтены при выборе ионоселективных анионо- и катионообменных мембран для электро-мембранного аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки РФ прикладных научных исследований и экспериментальных разработок в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». (Соглашение № 14.577.21.0238 от 03.10.2016 г., этап 2). Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0238.

#### **Список использованных источников**

1. Королев А.Г. Ресурсосберегающая технология утилизации продувочной воды испарителей водоподготовительной установки ТЭС на базе электромембранных модулей: диссертация кандидата технических наук. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2013.

2. Вафин Т.Ф. Разработка электромембранных методов утилизации высокоминерализованных жидких щелочных отходов ТЭС: диссертация кандидата технических наук. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2013.

3. Заболоцкий В.И., Шудренко А.А., Гнусин Н.П. // Электрохимия, 1988. – Т. 24. – № 6. – С. 744.

4. Заболоцкий В.И., Никоненко В.В. Перенос ионов в мембранах. – М.: Наука, 1996. – 393 с.

5. Заболоцкий В.И., Протасов К.В., Шарафан М.В. Исследование процесса электродиализного концентрирования хлорида натрия с гибридными органо-неорганическими ионообменными мембранами. // Электрохимия. 2010. – Т. 46. – № 9. – С. 1044–1051.

УДК 622.4

### **ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ**

*М.А. Коробицына*

*Санкт-Петербургский горный университет*

Нефть – важный энергоресурс, а для успешного развития энергетического комплекса необходимо обеспечение безопасных и комфортных условий труда, занятых в нем людей.

В России существует уникальное месторождение тяжелой высоковязкой нефти – Ярегское месторождение, расположенное в республике Коми. Добыча нефти там осуществляется подземным термошахтным способом. Основой такого способа является снижение вязкости и повышение подвижности нефти за счет разогрева вмещающего пласта с помощью закачки теплоносителя. В качестве теплоносителя используется насыщенный водяной пар. Используемой и наиболее перспективной является подземно-поверхностная система разработки (рис. 1). Закачка пара осуществляется в верхнюю часть пласта через поверхностные нагнетательные скважины. Под землей из добывающей галереи бурятся парораспределительные и добывающие скважины. В галерее нефтесодержащая жидкость собирается

в канавки и самотеком перемещается в зумпф, откуда по системе трубопроводов передается на переработку.

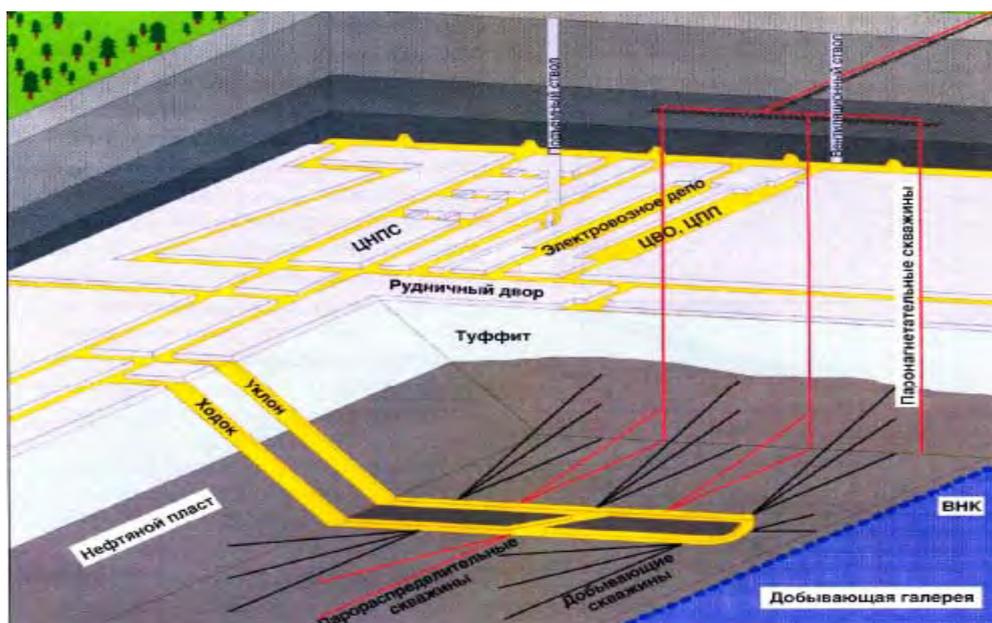


Рисунок 1 – Подземно-поверхностная система разработки

Нагнетание горячего пара в нефтяной пласт способствует появлению проблем, связанных с повышенной температурой и влажностью воздуха в выработках, проходящих непосредственно в продуктивном пласте, и в соединенных с ними. Так, во всех уклонных блоках основным вредным фактором на рабочих местах является температура воздуха, которая в буровых галереях превышает допустимые значения. Согласно правилам безопасности, температура воздуха в действующих выработках, не должна превышать 26 °С при относительной влажности до 90%. А при условии, что в выработках нет постоянного присутствия людей в течение смены, допускается температура воздуха до 36°С. В таблице 1 представлены результаты замеров температуры воздуха.

Таблица 1

Результаты замеров температуры воздуха в уклонных блоках НШ №3

Уклонный блок	Температура воздуха на входе в уклонный блок, t °С	Температура воздуха в буровой галерее, t °С
Уклон 4Т-4	31	50
Уклон 4Т-2	24	54
Уклон 3Т-1	20	37,5
Уклон 2Т-1	33	49
Уклон 1Т-1	29,3	49

Повышенная температура и влажность воздуха приводит к снижению производительности труда, быстрой утомляемости, снижению внимания, вялости и может оказаться причиной возникновения несчастного случая.

Факторы, формирующие тепловые условия в горных выработках нефтешахт делятся на эндогенные (обусловленные природными процессами) и экзогенные (техногенные). Наиболее существенный вклад вносят производственные процессы, проходящие в выработках шахт. Основными источниками тепловой энергии являются:

- выделение тепла искусственно разогретыми горными массивами, температура которых 48–52 °С;
- тепловыделения от неизолированных и изолированных нефтепроводов и паропроводов;
- отводы эксплуатационных скважин;
- теплоотдача от нефтесодержащей жидкости, протекающей по ОШП и ВШП, температура которой достигает 49–50 °С;
- выброс тепловой энергии и влаги с неконтролируемым выходом пара из затрубных пространств эксплуатационных скважин (температура пара 93–95 °С) и геологического нарушения (температура пара 72–78 °С).

Для регулирования теплового режима сейчас на шахте применяют только вентиляцию, как видно из натурных исследований этого недостаточно для соблюдения норм параметров микроклимата на рабочих местах.

Для улучшения теплового режима уже действующих уклонных блоков существует несколько возможных путей, одним из которых является увеличение объемов воздуха для усиленной вентиляции. Расход воздуха в этом случае ограничивается предельно разрешенной скоростью движения воздуха в горных выработках. Таким образом, значительного снижения температуры добиться достаточно сложно. Другим способом может служить установка специального охлаждающего оборудования, к примеру, при использовании подземной холодильной машины температура воздуха в конце буровой галереи будет не выше допустимых 26 °С. Недостатком этого способа является высокая стоимость оборудования и затраты на его обслуживание. Способом защиты персонала, работающего в условиях повышенных температуры и влажности воздуха на рабочих местах, может являться использование работникам средств индивидуальной защиты, например, теплозащитной одежды. Такой способ требует определенного контроля в исполнении, для действенной защиты защитный костюм должен быть выполнен из высококачественных материалов, стоимость и доступность которых, возможно, не будет удовлетворять возможностям потребителя. Защита горнорабочих может быть осуществлена методом регулирования режимов труда и отдыха. «Защита временем» распространена на предприятиях, где работа связана с воздействием одного или нескольких вредных факторов, при ограничении времени влияния которых, можно избежать возникновения несчастного случая или развития профессионального заболевания.

Проблема нормализации параметров микроклимата на рабочих местах при добыче нефти подземным способом с использованием паротеплового воздействия на пласт представляет собой комплексную задачу, которую невозможно решить, используя определенный вышеописанный способ. Для разных рабочих мест должно применяться наиболее эффективное решение, а сумма таких решений должна формировать систему мер по улучшению условий труда.

УДК 622.864

**ТЕПЛООБМЕН РАБОТНИКА В СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЕ  
С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ В УСЛОВИЯХ  
ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНОГО МИКРОКЛИМАТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

*М.Л. Рудаков, Л.В. Степанова*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

*e-mail: rudakovilo@rambler.ru, Stepanova\_LV@spmi.ru*

Специальная одежда используется человеком для защиты поверхности тела от вредных и опасных факторов производственной среды, таких как механические, физические, химические факторы и т.д. Особенностью же ведения добычи угля подземным способом является то, что одним из основных воздействующих факторов является угольная пыль на поверхностях и в воздухе рабочей зоны. Поэтому создание специальной одежды для работников, занятых на подземной добыче угля, требует использования специальной одежды высокой плотности. Это в свою очередь еще больше снижает теплоотдачу и влагообмен тела человека с окружающей средой. Таким образом, даже в условиях термонеutralного микроклимата происходит накопление тепла в организме человека, определяющееся теплопродукцией человека при выполнении им трудовой функции.

В настоящий момент спецодежду (шахтерский костюм) выдают на основе Типовых отраслевых норм выдачи средств индивидуальной защиты (СИЗ), которые не учитывают различное количество тепла, которое выделяет тело человека при различной физической нагрузке.

В рамках нашего исследования был произведен анализ результатов специальной оценки условий труда работников угольных шахт. Произведена выборка – 158 должностей и профессий, более чем с 820 рабочих мест, из них: 73 рабочие профессии, более 500 рабочих мест, связанные с работой под землей, на протяжении всей смены. Основной задачей было выявить критерий для классификации профессий и определить взаимосвязь энергозатрат работников с должностями и структурными подразделениями. Основные результаты представлены на рис. 1.

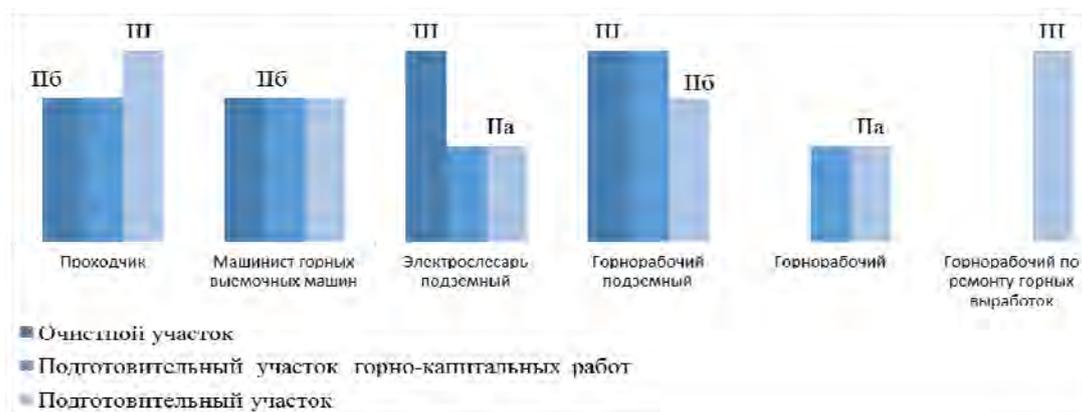


Рисунок 1 – Распределение категорий работ по уровню энергозатрат в зависимости от структурного подразделения и профессии

Как видно из графика, категории работ по энергозатратам строго не привязаны ни к профессиям работников, ни к участкам выполнения работ. Кроме того, основная часть работников относится к Па, Пб и Пв категории тяжести труда (рис. 2). Соответственно такие работы сопровождаются существенным выделением тепла от тела человека и для поддержания теплового комфорта необходимо более внимательно подходить к выбору специальной одежды для работников.

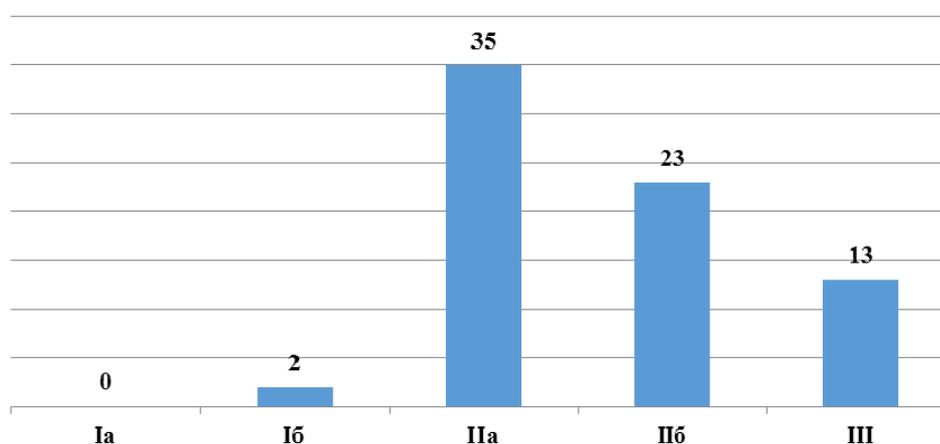


Рисунок 2 – Распределение рабочих профессий работников угольных шахт по категории энергозатрат

Тепловой комфорт характеризуется показателями, при которых сохраняется тепловое равновесие в организме человека и отсутствует напряжение в его системе терморегуляции. Наряду с субъективными тепловыми ощущениями существуют объективные показатели теплового состояния человека, одним из которых является средневзвешенная температура кожи [2]. В условиях термонеutralного микроклимата угольных шахт средневзвешенная температура кожи работника в основном зависит от свойств ткани, из которой изготовлена его спецодежда, а также от интенсивности тепловыделения человека [3].

На следующем этапе был произведен расчет средневзвешенной температуры кожи, по формуле 1, при которой обеспечивается тепловой комфорт для различных уровней энергозатрат работников. За верхней и нижней границей зоны теплового комфорта наступает активизация механизмов терморегуляции – сужения и расширения сосудов, потоотделения, дрожи.

$$t_{\text{свк}} = 36,07 - 0,0354Q/S, \quad (1)$$

где  $t_{\text{свк}}$  – средневзвешенная температура кожи, °С;

$Q$  – энергозатраты, Вт;

$S$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>[4].

Исходя из полученных результатов (рис.3), можно сделать вывод о том, что для поддержания теплового комфорта, при равных условиях микроклимата рабочей зоны работникам необходимо выдавать спецодежду с различными параметрами, в зависимости от уровня энергозатрат работника.

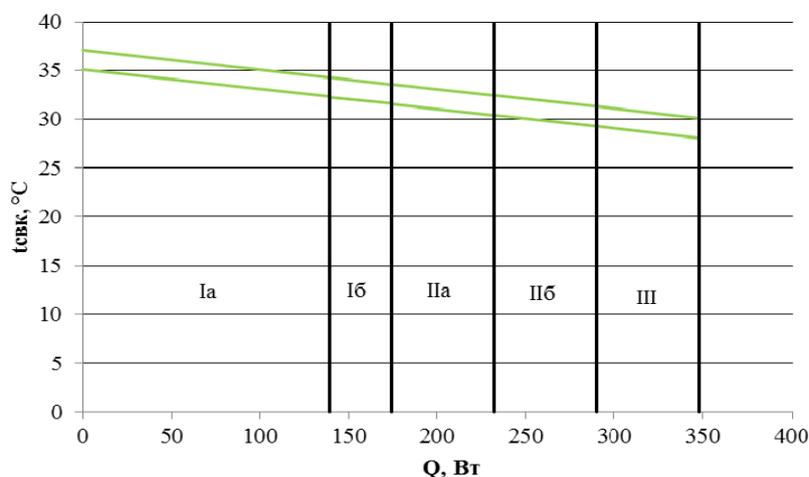


Рисунок 3 – Значение средневзвешенной температуры кожи человека, обеспечивающие тепловой комфорт, при различных категориях работ по тяжести

Основным из показателей, влияющих на значение средневзвешенной температуры кожи, и позволяющих косвенно судить о тепловом состоянии человека, является плотность теплового потока  $q$ . Он измеряется на тех же участках тела, что и температура кожи. Аналогичным же образом рассчитывается и средневзвешенная плотность теплового потока. Комфортный уровень теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, соответствующий различной физической активности, может быть определен по формуле 2.

$$q_{\text{свт}} = [83,3 + 39,5Q - 11658]/S, \quad (2)$$

где  $q_{\text{свт}}$  – средневзвешенная тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q$  – энергозатраты, Вт;

$S$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup> [5].

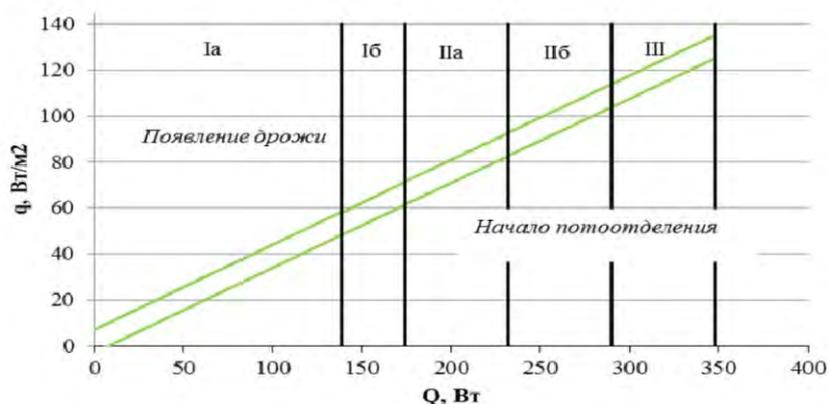


Рисунок 4 – Значения теплового потока от кожи человека, обеспечивающие тепловой комфорт, при различных категориях работ по тяжести

Как видно исходя из результатов расчета (рис. 4) значения теплового потока от кожи человека, обеспечивающие тепловой комфорт, существенно различаются для каждой категории работ по энергозатратам. Плотность теплового потока, составляет большую часть теплопотерь человека в условиях теплового комфорта (75%) и отражает комплексное воздействие факторов, обуславливающих теплообмен организма с окружающей средой [6].

Показатель теплового потока от тела человека в условиях термонейтрального микроклимата угольных шахт может служить для оценки конструкции спецодежды и материалов, используемых для ее изготовления. В рассматриваемых условиях предлагается снижать тепловую нагрузку на организм человека при выполнении физически тяжелых работ за счет снижения теплоизоляционных свойств спецодежды. Это возможно при уменьшении теплового сопротивления спецодежды, которое возможно определить по формуле 3.

$$R_c = ((t_k - t_{нар})S)/Q, \quad (3)$$

где  $R_c$  – тепловое сопротивление спецодежды,  $m^2C/Вт$ ;

$Q$  – количество тепла, удаляемого радиацией и конвекцией с поверхности тела, покрытой одеждой,  $Вт/м^2$ ;

$t_k$  – средневзвешенная температура кожи под спецодеждой,  $^{\circ}C$ ;

$t_{нар}$  – средневзвешенная температура наружной поверхности спецодежды,  $^{\circ}C$ ;

$S$  – площадь поверхности тела человека, покрытого спецодеждой,  $m^2$  [4].

По мнению автора, для создания условий теплового комфорта для работников угольных шахт в условиях термонейтрального микроклимата, необходимо использовать ткани и материалы для изготовления спецодежды соответствующие категории работ по энергозатратам. И на основе этого внести изменения в Типовые отраслевые нормы выдачи СИЗ.

### Список использованных источников

1. Голик А.С., Зубарева В.А. Охрана труда на предприятиях угольной промышленности. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2009. – 625 с.
2. R.C. Ghosh. Comfort of clothing // Text. Trends, 1972. – No.6. – Pp. 51-53.
3. Борисенкова Р.В., Махотин Г.Н. Труд и здоровье горнорабочих. – М., 2001. – 316 с.
4. Делль Р.А., Афанасьева Р.Ф., Чубарова З.Ф. Гигиена одежды. – М.: Легпромбытиздат, 1991.
5. Кошечев В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода. – М: Медицина, 1981/ – 188с.
6. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria” ISO 773.

УДК 621.7.044

### РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СКОРОСТНОГО ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

*И.В. Качанов, В.В. Власов, М.В. Кудин, С.А. Ленкевич  
Белорусский национальный технический университет  
Белорусская государственная академия авиации  
e-mail: vlasov881988@gmail.com*

В настоящее время в области промышленного производства весьма остро стоит вопрос создания современных, оснащенных прогрессивными техпроцессами и оборудованием, специализированных предприятий по проектированию и изготовлению высококачественной технологической оснастки и инструмента. Как показывает мировой промышленный опыт, машиностроительным предприятиям необходимо применять инструмент, штампы и пресс-формы качеством на порядок выше, чем выпускаемая продукция. Это связано с усложнением выпускаемой продукции и сокращением ее жизненного цикла в соответствии с требованиями рынка. Благодаря ряду преимуществ, (адиабатные условия протекания процесса, снижение контактного трения, благоприятное действие сил инерции, способствующее лучшему заполнению матричной полости и т.д.) процессы скоростного формоизменения, особенно скоростного горячего выдавливания (СГВ), создают эффективные условия для обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов, широко используемых в инструментальном производстве [1, 2]. В связи с тем, что высокоскоростная штамповка обеспечивает получение точных заготовок с повышенными механическими свойствами, она может быть использована как технологический процесс изготовления стержневых деталей штамповой оснастки [3, 4]. В БНТУ на кафедре «Кораблестроение и гидравлика» разработаны техпроцессы создания биметаллического стержневого ин-

струмента, предназначенного для осуществления операций горячей и холодной штамповки [5]. Существенным инновационным моментом в разработанных техпроцессах является формирование сварного соединения разнородных сталей на основе диффузионного переноса легирующих элементов в зоне соединения, что обеспечивает высокое качество и прочность соединения [6].

Для проведения исследований использовались составные заготовки, состоящие из композиций сталей 40X+5XHM и 40X+45X3B3MΦC (ДИ23). Формообразование и соединение разнородных металлов осуществляли в конических разъёмных полуматрицах специальной конструкции по запатентованному способу изготовления стержневых деталей за счет совместного скоростного пластического истечения обоих металлов в осевом направлении с последующим затеканием в кольцевую канавку, расположенную на расстоянии от донной части на высоте  $\lambda l$ , пропорциональной высоте рабочей части составной заготовки и коэффициенту вытяжки  $\lambda$ , которому задавались значения  $\lambda=2-5$  [7, 8]. При совмещении процессов СГВ биметаллических изделий и режима ВТМО в первую очередь необходимо установить температурный режим, который обеспечит термическую активацию для качественного соединения двух сталей и полное растворение карбидов легирующих элементов в аустените, что обеспечит требуемые механические свойства деформированных материалов.

Для композиции сталей 40X+5XHM температурный интервал штамповки, обеспечивающий наилучшую пластичность составляет: 40X –  $T_{ш1} = 800-1250^\circ\text{C}$ ; 5XHM –  $T_{ш2} = 850-870^\circ\text{C}$ . Температуры критических точек Ас3, обеспечивающие проведение полной закалки составляют:  $782^\circ\text{C}$  (40X);  $780^\circ\text{C}$  (5XHM). Следовательно, с учетом подстуживания заготовки при переносе в штамп, оптимальная температура нагрева составной заготовки в печи должна составлять  $T_{з1} = 1150^\circ\text{C}$  и время нагрева 1 мин на 1 мм сечения образца. Некоторые результаты штамповки по предложенной технологии представлены на рис. 1.

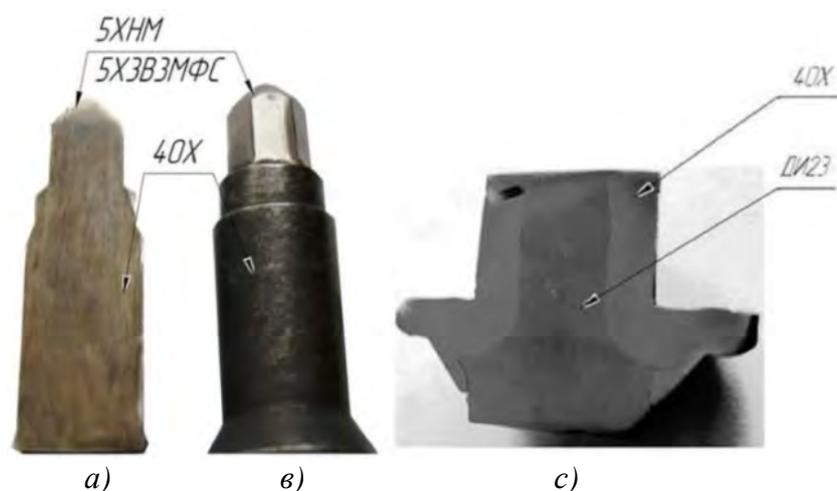


Рисунок 1 – Вид продольных шлифов (a, c) и поковки биметаллического пуансона (b) после скоростного выдавливания при  $V_0 = 70-80$  м/с,  $T_0 = 1150 \pm 20^\circ\text{C}$ ;  $\lambda = 2$  и 5 (a, b);  $\lambda = 3$  (c)

Из рассмотрения на рис. 1 продольных шлифов, изготовленных из биметаллических образцов, которые были отштампованы по схеме скоростного горячего выдавливания в разъемных полуматрицах, хорошо видны четкие, контрастные границы соединения разнородных металлов как в поперечном (рис. 1а), так и в осевом (рис. 1в) направлениях.

Исследования сварного соединения в зоне шва биметаллического пуансона проводились на рентгеноскопической системе контроля качества X-CUBE contrast. Рентгенограммы стержневой части биметаллического образца представлены на рис. 2.



Рисунок 2 – Рентгенограмма биметаллических образцов, полученных при выходном напряжении и токе равных 198 kV-6,3 mA; режимы изготовления образцов  $V_0 = 70-80$  м/с,  $T_0 = 1150 \pm 20^\circ\text{C}$

Как видно из рис. 2, образцы имеют четко выраженную однородную структуру в зоне сварного соединения с отсутствием окисных включений, что благоприятно сказывается на эксплуатационных и физико-механических характеристиках биметаллического инструмента, предназначенного для металлообработки на различных эксплуатационных режимах.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

- разработаны техпроцессы создания биметаллического стержневого инструмента, предназначенного для осуществления операций горячей и холодной штамповки;

- установлена возможность получения качественного биметаллического соединения, которое формируется при совместном пластическом течении на поверхности контакта двух частей заготовки с удалением поверхностных оксидных пленок при деформировании со скоростью  $V_0 = 70-80$  м/с и температурой составной заготовки  $T = 1150 \pm 20^\circ\text{C}$ .

### Список использованных источников

1. Качанов И.В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И.В. Качанов; под ред. Л.А. Исаевича. – Минск: Технопринт, 2002. – 327 с.
2. Здор Г.Н. Технологии высокоскоростного деформирования материалов / Г.Н. Здор, Л.А. Исаевич, И.В. Качанов. – Минск: БНТУ, 2010. – 456 с.
3. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И.В. Качанов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – 198 с.
4. Голованенко С.А. Производство биметаллов / Л.В. Меандров. – М.: Металлургия, 1966. – 153 с.
5. Качанов И.В., Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Шарий В.Н. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части. – Мн.: БНТУ, Техническая литература, 2011. – 198 с.
6. Капранов В.Н. Особенности высокоскоростного горячего выдавливания формовочного инструмента повышенной точности. / В.Н. Капранов, В.Я. Осинных. // Повышение качества и эффективности изготовления технологической оснастки методами пластического деформирования. Сборник тезисов всесоюзной научно-технической конференции. – Таллин, 1977. – С. 125-129.
7. Способ изготовления стержневой детали; МКИ В21 J 5/00 / И.В. Качанов, В.Н. Шарий, М.В. Кудин, В.В. Власов, С.А. Ленкевич, А.А. Рубчеля; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т., заявка № а20140489; заявл. 16.09.14.
8. Качанов И.В. Способ штамповки деталей со стержнем: пат. 18113 Респ. Беларусь, МКИ В 21 J 5/00 / И.В. Качанов, Г.Н. Здор, Л.А. Исаевич, В.Н. Шарий, М.В. Кудин, В.В. Власов; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – №А20110844; заявл. от 16.06.2011 г; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014.

УДК 669:620.197

### ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ

*И.В. Качанов, А.Н. Жук, А.В. Филипчик, В.А. Ключников  
Белорусский национальный технический университет*

Для современного машиностроительного производства Республики Беларусь характерно отсутствие собственной сырьевой базы, результатом чего является существенная зависимость от импортных материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При таких условиях работы эффективность производства может быть достигнута за счет экономии и использования энерго- и ресурсосберегающих технологий [1–10]. Эффективность реализации целого ряда технологических процессов напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, например, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью

$R_a = 0,4-1,0$  мкм с минимальным уровнем упрочнения (микротвердость  $H_{\mu}$  после обработки по сравнению с исходным значением  $H_{\mu 0}$  должна находиться в пределах  $H_{\mu} = 1,5-1,6 H_{\mu 0}$ ) и низкой отражательной способностью [11, 12].

Для реализации технологии РСО на кафедре «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ была разработана конструкция струйного блока (рис. 1) характеризующаяся патентной новизной [13]. Конструкция включает конусное сопло 1, установленное в корпус 2, который через уплотнение 3 плотно прижимается к очищаемой поверхности 4. Изменение расстояния  $L$  между поверхностью и соплом обеспечивается за счёт перемещения последнего в радиальных опорах 5.

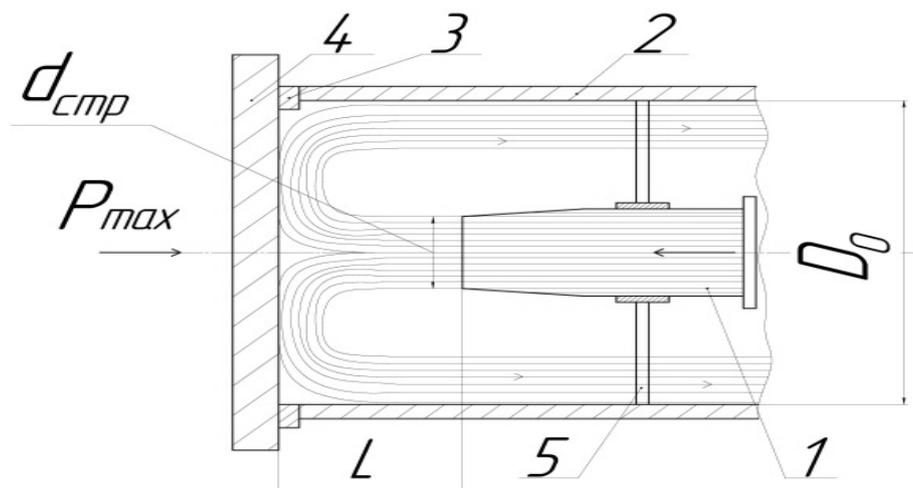


Рисунок 1 – Схема струйного устройства для реализации процесса реверсивно-струйной очистки

При подключении данного струйного блока к насосной установке поток рабочей жидкости после взаимодействия с поверхностью 4 разворачивается на  $180^{\circ}$  относительно своего первоначального движения. Этот разворот обеспечивает формирование реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению давления  $p_{max}$  струйного воздействия в  $1,25 \div 1,5$  раза (теоретически в 2 раза) по сравнению с традиционной схемой очистки, когда струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом  $90^{\circ}$  относительно своего первоначального направления течения.

В работах [14, 15], в результате решения вариационной задачи по установлению минимальной мощности обработки было установлено, что минимальная сила разрушения слоя коррозии на обрабатываемой поверхности отмечается (при прочих равных параметрах (давление на входе в сопло  $p_c$ , расстояние  $L$  от сопла до обрабатываемой поверхности) при коэффициенте обжатая струи  $\lambda = 0,063$ ).

В частности, исследованиями была установлена целесообразность проведения очистки в три этапа. При этом на первом этапе в качестве рабочей жидкости использовалась вода, содержащая речной песок с размером фракций  $0,1-0,63$  мм и полиакриламид. Концентрации речного песка  $K_{р.п.}$  и по-

лиакриламида  $K_{п}$  составляли соответственно 8 – 10 % и  $10^{-6}$  –  $10^{-2}$  % от общего объема рабочей жидкости. Предварительная подготовка речного песка по фракционному составу осуществлялось в устройстве гравитационного типа действия, которое характеризуется патентной новизной [16].

На втором этапе РСО использовалась чистая вода, с целью полной промывки очищенной поверхности от мелкодисперсных фракций речного песка, что необходимо для проведения третьего этапа очистки.

На третьем этапе осуществления РСО эжектировалась рабочая жидкость, содержащая воду, в которой были размешаны бентонитовая глина и кальцинированная сода с концентрациями соответственно  $K_{б} = 5\text{--}20\%$  и  $K_{к.с.} = 2\text{--}10\%$  от общего объема. Указанные концентрации после эжектирования в струйном сопле смешивались в струе, действующей на обрабатываемую поверхность, до значений  $K_{б,с} = 2\text{--}5\%$  и  $K_{к.с.с} = 0,2\text{--}1,0\%$ . Указанные диапазоны были установлены как оптимальные при подготовке очищенной поверхности под лазерную резку (ЛР). Обязательным является операция сушки образцов при комнатной температуре ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в течение 20–24 ч., что позволяет сформировать на обработанной поверхности антикоррозионный защитный слой с толщиной  $\delta$ , составляющий не менее 1,1–1,2 от максимальной высоты выступов микронеровностей.

#### **Выводы**

1. Установлено, что после сушки образцов, обработанных рабочей жидкостью на основе воды с концентрациями бентонитовой глины и кальцинированной соды соответственно  $K_{б,с} = 2,0\text{--}5,0\%$  и  $K_{к.с.с} = 0,2\text{--}1\%$ , на всей очищенной поверхности образцов формируется защитное пленочное покрытие со средней толщиной  $\delta = 5\text{--}7$  мкм.

2. Проведен анализ образовавшейся на поверхности очищенного образца, пленочного покрытия с установлением его химического состава и толщины.

3. Проведены производственные испытания очищенных образцов, в результате которых установлена эффективность РСО при подготовке стальных поверхностей под ЛР.

#### **Список использованных источников**

1. Банников И.И. Механизация очистки и окраски подводной части судов / Банников И.И., Финкель Г.Н., Хейфец В.Л.// Л.: Судостроение, 1980. – 116 с.

2. Агасарян Р.Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р.Р. Агасарян. – Ереван: АрмНИИНТИ, 1990. – 51 с.

3. Меркулов В.Н. Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении / К.Н. Меркулов. – Киев: УкрНИИНТИ, 1987. – 10 с.

4. Тихомиров Г.А. Гидрорезание судостроительных материалов / Г.А. Тихомиров. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.

5. Крайко А.Н. Механика жидкости и газа. Избранное / Под общей ред. А.Н. Крайко. Ред.-сост. А.Н. Крайко, А.Б. Ватажий, Г.А. Любимов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 752 с.

6. Вилькер Д.С. Лабораторный практикум по гидромеханике / Вилькер Д.С. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 351 с.

7. Гибсон А. Гидравлика и ее приложения / А. Гибсон; пер. с 6-го англ. изд. А.Е. Стратоницкой и С.С. Соколова; под ред. М.В. Потапова. – М., Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1934. – 610 с.: ил. – Указ.: с. 606-610.

8. Френкель Н.З. Гидравлика. – М., Л.: Госэнергиздат, 1956. – 456 с.

9. Кудинов В.А. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование/ В.А. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

10. Комов В. А. Гидравлика. – М., Л., 1951. – 230-233с.

11. Качанов И.В. Теоретические и экспериментальные исследования по определению струйного давления рабочей жидкости на обрабатываемую плоскую поверхность / И.В. Качанов, А.В. Филипчик // Наука и техника. – 2012. – №1. – С. 79-85.

12. Памфилов, Е.А. Формирование качества поверхностей при лазерной обработке / Е.А. Памфилов, В.Д. Северин // Вестник машиностроения. – 1982. №4. – С. 46-48.

13. Устройство для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. № 16526 Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00, В63В 59/08 / Качанов И.В., Жук А.Н., Шаталов И.М., Шарий В.Н., Мяделец С.О.; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. - № а 20100719; заявл. 12.05.2012; опубл. 30.10.2012.

14. Качанов И.В. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И.В. Качанов, А.В. Филипчик, В.Е. Бабич, А.Н. Жук и С.И. Ушев. Моногр. – Мн.: БНТУ, 2016. – 167 с.

15. Качанов И.В. Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости / И.В. Качанов, В.В. Веремеюк, А.Н. Жук // Наука и техника. – 2014. – № 2. – С. 46–51.

16. Устройство для отбора осветленной гидросмеси на земснаряде пат. № 14172 Респ. Беларусь, МПК Е 02F 3/88/ Качанов И.В., Жук А.Н., Песцов Г.В., Чернобылец А.Н.; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20081686; заявл. 24.12.2008; опубл. 30.04.2010.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

*С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.В. Рязанов, А.Н. Пронин,  
Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов*

*Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Российская Федерация*

Процессы смешения неизотермических потоков существенно влияют на параметры теплоносителя на входе в активную зону, что определяет её теплотехническое состояние. На входе в реактор могут возникать неравномерные потоки теплоносителя по разным петлям, приводящие к локальным отклонениям параметров от номинальных. Процессы, протекающие при отклонении параметров теплоносителя от допустимых значений, необходимо оценивать при обосновании безопасной работы ядерных энергетических установок, поскольку они приводят к существенной неравномерности теплогидравлических характеристик в камере смешения реактора и на входе в каналы активной зоны. Такие явления нуждаются в детальном изучении при помощи CFD-кодов, которые должны проходить процедуру верификации основе представительных экспериментальных данных.

На базе кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан экспериментальный стенд (рис. 1) для исследования смешения потоков в модели водо-водяного реактора с целью детального изучения процессов локального отклонения изучаемых параметров. Стенд спроектирован в виде двух контуров: исследовательского контура смешения потоков с установленной экспериментальной моделью и контура охлаждения, необходимого для отвода тепла и подготовки «холодного» теплоносителя.

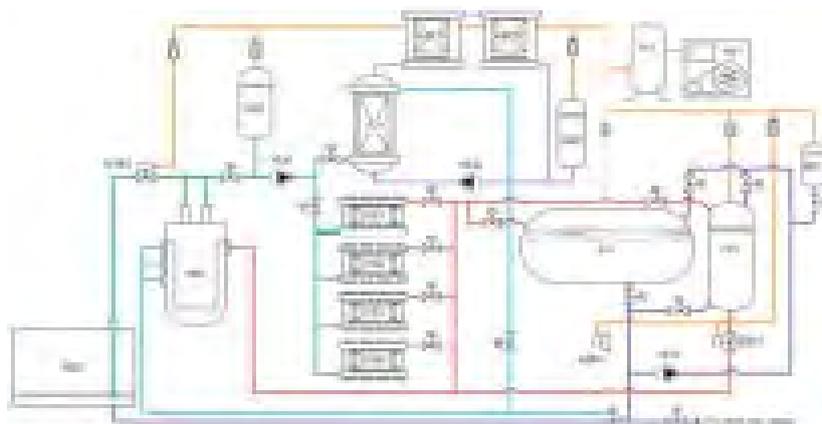


Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда

Оборудование стенда позволяет создать режимы как ламинарные, так и турбулентные течения при различной температуре, расходах и кон-

центрации примесей в потоке теплоносителя. Параметры, при которых может осуществляться моделирование, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Число имитирующих петель циркуляции теплоносителя	6
Мощность нагревательных установок (суммарная), кВт	800
Мощность контура охлаждения (максимальная), кВт	960
Расход через экспериментальную модель, м <sup>3</sup> /ч	до 200
Температура смешиваемых потоков, °С	15-200
Диаметры исследуемых моделей по внешней обечайке, мм	400-1500
Давление в контуре смешения потоков, кгс/см <sup>2</sup>	до 20
Удельная электрическая проводимость теплоносителя	до 4000 мкСм/см

Экспериментальная модель (ЭМ) представлена на рис. 2. Экспериментальная модель оснащена четырьмя патрубками ввода теплоносителя, по одному из которых подается соленый поток, по трем другим дистиллированная вода. Теплоноситель проходит от входных патрубков ЭМ вниз по опускной кольцевой камере, попадает в нижнюю напорную камеру, откуда распределяется по дросселированным каналам имитаторам активной зоны. По окончании подъема в каналах имитаторов теплоноситель выходит в верхнюю сливную камеру и удаляется из модели через два выходных патрубка в крышке.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной модели

Экспериментальные исследования основывались на методе пространственной кондуктометрии. Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, а также исследовательской части, при помощи которой выполняются замеры физических характеристик в области турбулентного

смещения потоков в модели реактора. Исследовательская часть измерительной системы основана на применении кондуктометрических датчиков сетчатой и стержневой конструкции (рис. 3).

Датчики установлены на всем протяжении опускной камеры экспериментальной модели (в трех плоскостях с азимутом  $20^\circ$  между соседними датчиками), а также на входе и выходе из области, имитирующей каналы активной зоны. Характеристики измерительной системы дают возможность получать частотно-энергетические характеристики флуктуаций значений локальной концентрации для последующего восстановления спектра турбулентных пульсаций в потоке.

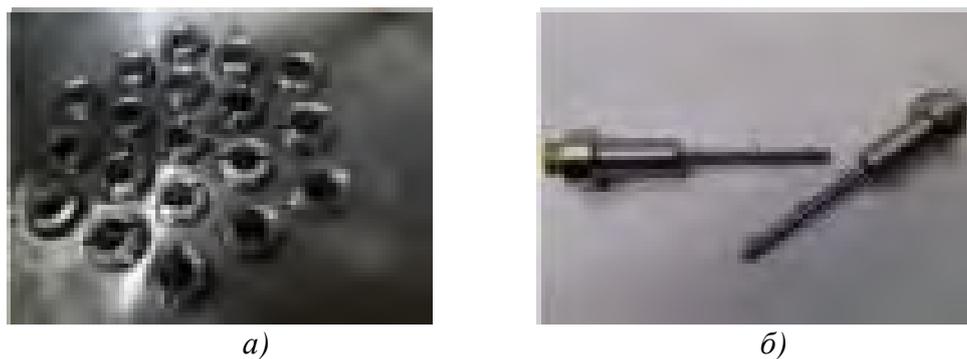


Рисунок 3 – Исследовательская часть измерительной системы: *а* – сетчатый датчик (верхняя камера), *б* – стержневые датчики

Экспериментальные исследования проводились при различных параметрах. Изменяя два параметра – вязкость и скорость теплоносителя, удалось провести исследования в диапазоне чисел Рейнольдса от 10000 до 40000. Обработка показаний исследовательской измерительной системы позволила получить поле относительного солесодержания в экспериментальной модели на входе и выходе имитатора активной зоны экспериментальной модели (рис. 4). В ходе обработки данных эксперимента выявлено наличие закрутки потока при движении по кольцевому зазору экспериментальной модели по часовой стрелке на угол порядка  $180^\circ$ .

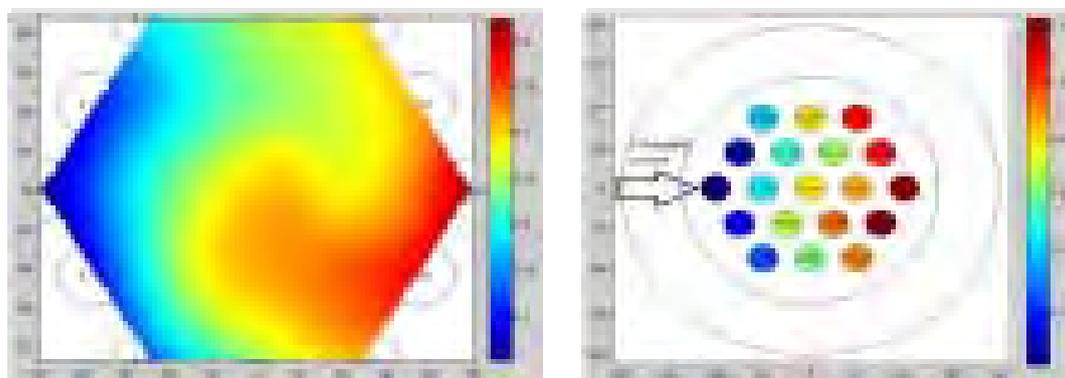


Рисунок 4 – Распределение относительной концентрации в нижней камере экспериментальной модели (а) и на выходе из каналов-имитаторов(б) ( $Re=10000$ ,  $t=20^\circ C$ )

Претестовые и посттестовые CFD-расчёты позволили оценить эффективность использования моделей, заложенных в расчётные программы, а также определить явления и эффекты, которые изначально не были учтены. Таким образом, уже на данном этапе возможности стенда позволяют получить представительные экспериментальные данные, которые могут быть использованы в качестве верификационной базы для расчётных программ.

В рамках проведения следующего этапа планируется провести исследования процессов смешения теплоносителя в напорной камере реактора при варьировании критерии Рейнольдса за счет изменения скорости потока, молекулярной вязкости и гидравлического диаметра.

УДК 621.039

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

*С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов,  
Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Российская Федерация*

Одними из задач атомной энергетики РФ являются: повышение мощности и надежности работающих АЭС, создание первой в мире плавучей АЭС и др. Привнося значительный вклад в достижение поставленных целей АО «ОКБМ Африкантов» (РФ, г. Н. Новгород) проводит разработки ТВС для реакторов различных типов. К таким кассетам относятся: ТВСА для реакторов ВВЭР-1000 и ТВС КЛТ-40С для плавучей АЭС. Перечисленные топливные сборки имеют принципиальные конструктивные отличия от других типов ТВС аналогичного назначения, что позволяет получать более высокие эксплуатационные показатели при сохранении уровня теплотехнической надежности. Конструкции ТВС предусматривают наличие решеток интенсификаторов. Таким образом, необходимы исследования, которые позволят оценить влияние решеток на поток теплоносителя, с целью выбора оптимальной конструкции с точки зрения интенсивности перемешивания и гидравлических потерь.

Для оценки влияния на поток теплоносителя различных типов решеток, в базовой научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» создан экспериментальный стенд, представляющий собой аэродинамический контур через который прокачивается воздух (рис. 1).

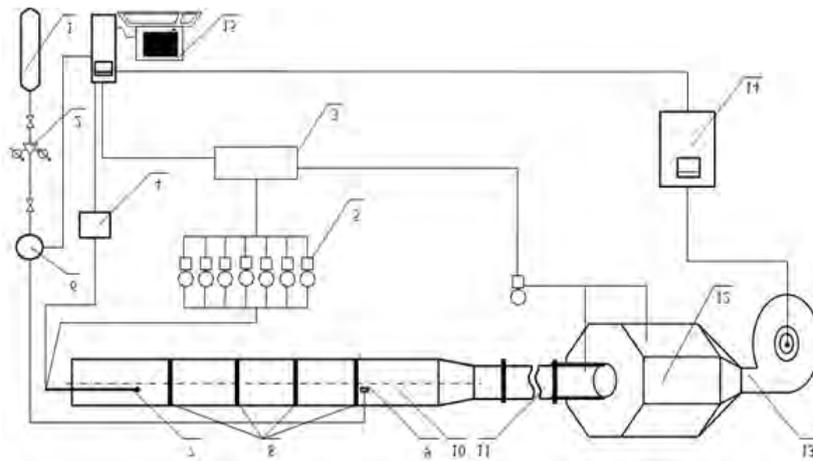


Рисунок 1 – Схема аэродинамического стенда

1 – газовый баллон, 2 – редуктор, 3 – базовый блок коммутации/измерения, 4 – модульный газоанализатор, 5 – преобразователи давления, 6 – регулятор расхода газа, 7 – отборный зонд, 8 – статические отборы, 9 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ, 10 – экспериментальная модель, 11 – успокоительный участок, 12 – ресиверная емкость, 13 – вентилятор высокого давления, 14 – преобразователь частоты, 15 – ЭВМ

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока в экспериментальных моделях (ЭМ) ТВС проводились методом трассера. Принцип проведения исследований заключается в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступает в ресиверную емкость, движется через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем, пройдя через ЭМ, выбрасывается в атмосферу. Газ-трассер подается через впускной зонд (рис. 2а) в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка и также выбрасывается в атмосферу вместе с газовойдушной смесью. При помощи трубки Пито (рис. 2б), используемой в качестве отборного зонда, за исследуемым поясом решетки производится замер концентрации трассера по длине и сечению ЭМ. Каждая из исследуемых ЭМ в поперечном сечении условно делилась на ячейки, каждой из которых присваивался свой порядковый номер. Также по длине каждая изучаемая сборка разбивалась на определенное количество сечений, в зависимости от места установки исследуемой решетки. Измерение полей скорости в ЭМ производилось при помощи пневмометрического пятиканального зонда. Данным зондом (рис. 2в) определяется вектор скорости в точке по трем его компонентам путем измерения давлений в отверстиях чувствительной головки зонда и последующего пересчета по тарировочным характеристикам.

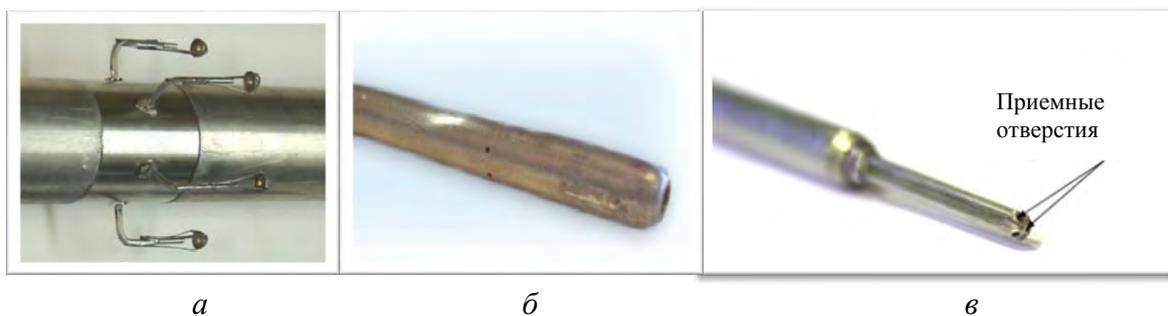


Рисунок 2 – Оснастка для проведения экспериментов:  
*а* – впускной зонд, *б* – трубка Пито, *в* – пятиканальный пневмометрический зонд

На аэродинамическом стенде были также определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) всех исследуемых решеток. Анализ результатов исследований КГС показывает, что выбранные конструкции и геометрические характеристики изучаемых решеток в диапазоне требуемых чисел  $Re$  обеспечивают их необходимое гидравлическое сопротивление, а полученные значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных решеток. Погрешности измерения концентрации газа-трассера не превышают 1,5%, подача газа обеспечивается регулятором расхода газа El-Flow с отклонениями 0,5% массового расхода. Измерение давлений в каналах пневмометрических зондов осуществлялось при помощи преобразователей избыточного давления с пределом допускаемой основной погрешности 0,25%, погрешность получаемых проекций скорости не превышала 7% от ее абсолютного значения.

### **Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВСА**

Исследования локальных характеристик потока в ТВСА проводились на различных ЭМ, представляющих собой масштабные копии фрагментов активной зоны и сегментов кассет (рис. 3). 57 и 94 стержневые модели имитируют область АЗ на стыке соседних ТВС реакторов ВВЭР, что дает возможность исследования межкассетных взаимодействий в потоке.

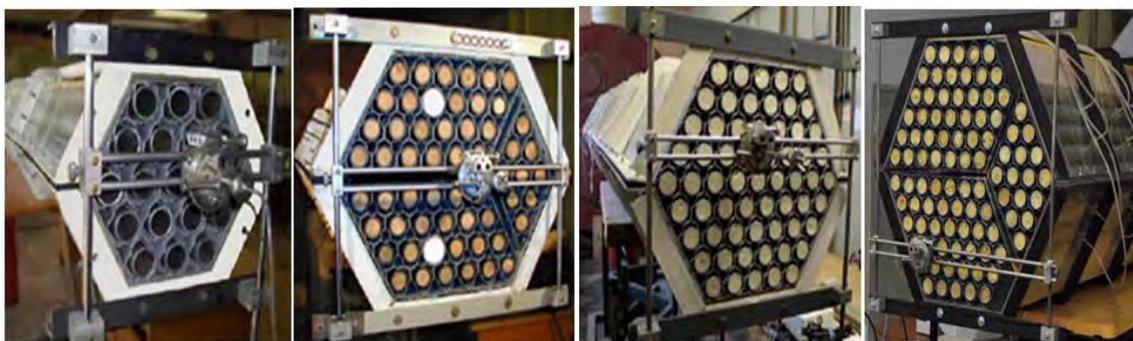


Рисунок 3 – Экспериментальные модели ТВСА

В ходе исследований определялась оптимальная конфигурация установки перемешивающих решеток (ПР) типа «порядная прогонка» и «закрутка вокруг твэла». По результатам комплексных исследований были

сделаны следующие выводы: экспериментально определены расходы через характерные ячейки модели; наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного конвективного движения потока по направлению отгиба соответствующих дефлекторов и, как следствие, появлению поперечных постепенно затухающих составляющих скорости; изменение концентрации трассера в ячейках показывает, что не весь поток теплоносителя движется по направлению расположения дефлекторов. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока; определены длины затуханий возмущений массообменных процессов за ПР ( $l/d \approx 14, 16$ ,  $d$  – гидравлический диаметр модели); при последовательной постановке двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации трассера в поперечном сечении экспериментальной модели, по сравнению с одной ПР типа «порядная прогонка» или ПР типа «закрутка вокруг твэла».

**Выводы.** В результате экспериментальных работ выявлены основные закономерности течения в топливных сборках различных конструкций. На основе исследований массообменных характеристик был создан расчетный алгоритм, заложенный в программу для ЭВМ. Созданная программа позволяет оценивать распределения концентрации, используя экспериментально полученные поля скоростей. Результаты расчетов были использованы для вычисления коэффициентов массообмена между характерными ячейками моделей, а также эффективного коэффициента перемешивания ПР для ТВСА реакторов ВВЭР, используемых при инженерных расчетах АЗ в качестве замыкающих соотношений.

Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкций АЗ. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

## СЕКЦИЯ 5 ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 519.8

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЯН НА ПУТИ ОГНЯ

*В.Б. Таранчук, Д.В. Баровик*

*Белорусский государственный университет*

*e-mail: taranchuk@bsu.by*

Создание компьютерных моделей лесных пожаров важно для использования подразделениями по устранению чрезвычайных ситуаций, оптимизации их действий, минимизации потерь, оценке предлагаемых решений по профилактическим мерам. Особую важность представляют собой прогнозы возможного развития пожаров вблизи объектов энергетики. С обзором компьютерных моделей лесных пожаров можно ознакомиться по публикациям [1-2]. В настоящей работе предлагается модификация программного комплекса [3] для подготовки типовых сценариев возможного развития пожаров, в частности, вблизи строящейся Белорусской АЭС. В работе обсуждаются дополнения модели, теоретические основы математического описания, приведены примеры качественных оценок динамики процессов для типовых представительных конфигураций лесных массивов. В предложенной математической модели распространения лесных пожаров вычисляется эволюция распределений следующих величин:  $T$  – осредненная по высоте слоя лесного горючего материала (ЛГМ) температура; объемные доли многофазной реагирующей среды, массовые концентрации компонентов газовой фазы. Принятое математическое описание процесса распространения низового пожара, предложенный и реализованный метод численного решения изложены в [4-7].

**Результаты моделирования при наличии лесопожарных разрывов.** Краевая задача для описывающей процесс распространения пожара системы дифференциальных уравнений решалась численно с использованием *Wolfram Mathematica*. Применялись предложенные и обоснованные авторами явные разностные аппроксимации с равномерной сеткой по пространству и переменным временным шагом по времени. Временные шаги выбирались из условий устойчивости численной схемы с учетом специфики и скоростей протекания физико-химических процессов на каждом конкретном шаге.

Отметим представительные результаты вычислительных экспериментов. Рассмотрим квадратную область лесного массива. Считается, что в центре области «возникает» очаг горения, на рисунках слева показаны граница зоны очага (в центре), а сама схема очага – фрагмент в правом верхнем углу. Принято, что скорость ветра в пологе леса направлена слева направо. При этом по направлению ветра, против ветра и перпендикулярно (на верхнем фланге)

имеются участки (поляны) с отсутствием горючего материала (растительности) – границы полян показаны пунктиром. На рис. 1–3 приведены карты распределения температуры в два момента времени: в процессе «огибания» полян, когда фронты размыкаются, и после прохождения полян фронтом. Приведены результаты трех характерных вариантов развития процесса.

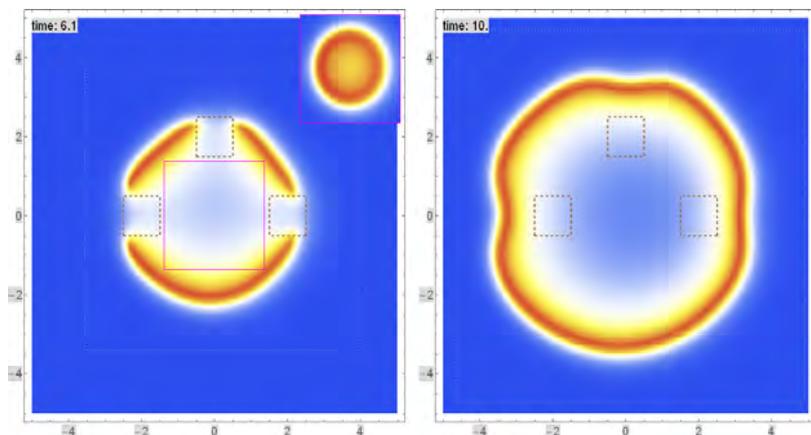


Рисунок 1 – Скорость ветра 1 м/с. Огибание фронтом пожара трех полян

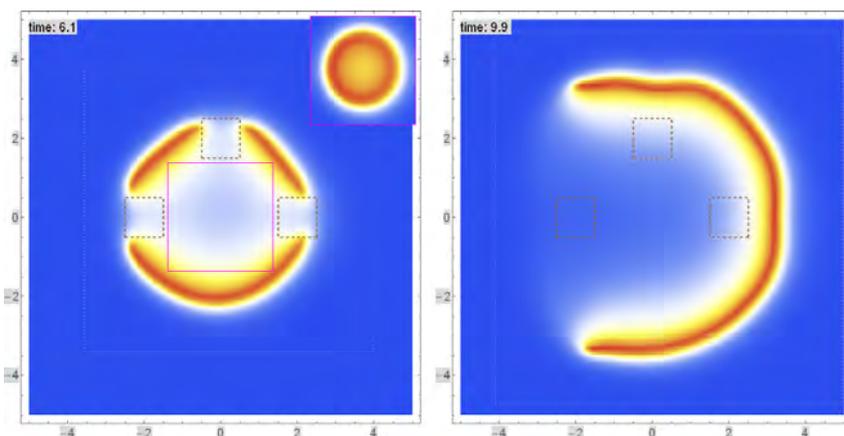


Рисунок 2 – Скорость ветра 1.5 м/с.  
Прекращение распространения пожара «против» ветра

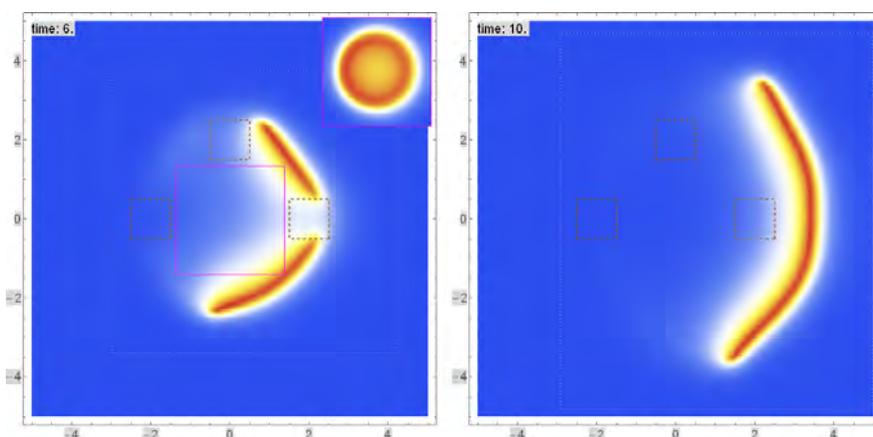


Рисунок 3 – Скорость ветра 2 м/с.  
Фронт пожара распространяется только по направлению ветра

Для приведенных вариантов моделирования отличие было только в величине равновесной скорости ветра на уровне середины высоты пламени, а именно, расчеты проводились для значений скорости  $V = 1, 1.5, 2$  м/с. Очаг пожара распространяется эллипсом, достигает полей и начинает огибать их. При скорости ветра 1.5 м/с имеет место прекращение распространения пожара «против» ветра после «разрыва» фронта поляной. Далее эволюция фронта пламени разная.

Результаты показывают и можно сделать выводы, прогнозировать три разных сценария развития процесса на финальной стадии. Варианты:

- смыкание фронта пожара независимо от направления ветра (рис. 1);
- при увеличении скорости ветра смыкание фронта против ветра не происходит (рис. 2);
- при достаточно сильном ветре встреча препятствия на пути фронта приводит к его остановке во всех направлениях кроме направления по ветру (рис. 3).

Надо понимать, что отмеченные сценарии реализуются в природе при разных значениях скорости ветра, а соответствующие значения могут определяться в вычислительных экспериментах, они будут зависеть от влажности и состава лесного горючего материала, температуры и влажности окружающей воздушной среды.

#### **Список использованных источников**

1. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour / E. Pastor [et al] // Progress in Energy and Combustion Science, 2003. – Vol. 29. – P. 139-153.

2. Баровик Д.В. Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник БГУ. Серия 1, Физика, Математика, Информатика, 2011. – № 3. – С. 78-84.

3. Баровик Д.В. Методические и алгоритмические основы программного комплекса «Расчет и визуализация динамики лесного пожара» / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 2 (30). – С. 22-33.

4. Баровик Д.В. Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник БГУ. Серия 1, Физика, Математика, Информатика, 2010. – № 1. – С. 138-143.

5. Barovik D.V. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires / D.V. Barovik, V.B. Taranchuk // Mathematical Modelling and Analysis, 2010. – Vol. 15. – № 2. – P. 161-174.

6. Баровик Д.В. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // Труды института математики. – 2013. – Том 21. – № 1. – С. 3-15.

7. Баровик Д.В. О корректности одной математической модели низовых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // Докл. НАН Беларуси. – 2013. – Т. 57, – № 4. – С. 5-9.

УДК 621.9.015

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВЗРЫВООПАСНЫМИ СРЕДАМИ  
В АТОМНОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

*Д.А. Осминко, В.В. Максаров*

*Санкт-Петербургский горный университет*

*e-mail: dart\_main@mail.ru, maks78.54@mail.ru*

***Аннотация.** Статья посвящена проблемам безопасности, связанных с ненадежной герметизацией внутренней полости электромагнитных клапанов, используемых в атомной, тепловой и нефтегазовой промышленности, и сложностям при производстве таковых на примере растачивания глубокого ступенчатого отверстия в детали «Втулка» клапана, работающего в широком диапазоне рабочих сред, давлений и температур. В статье предлагается надёжный способ по растачиванию таких отверстий с использованием нового инструмента, который позволит повысить точность поверхностного слоя и снизит уровень высокочастотного колебательного процесса во время обработки, не прерывая процесс на каждом из участков. Предложенный способ позволит сократить технологический процесс, что как следствие, повысит производительность и позволит производить изделия без использования специализированного дорогостоящего оборудования.*

***Ключевые слова:** безопасность, электромагнитный клапан, тепловая энергетика, герметичность, точность изготовления, лезвийная обработка.*

В различных отраслях промышленности достаточно широкое применение находят детали с комбинированными поверхностями, состоящие из разнородных конструкционных материалов. В изготовлении подобных деталей главной технологической проблемой является инструментальное обеспечение и выбор способа обработки для воспроизводства заданных точностных и качественных показателей. Для тепловой, атомной и нефтегазовой промышленности подобные изделия получили распространение в области производства 2-ходовых электромагнитных запорных клапанов, отличающихся взрывозащищенностью и работой в широком диапазоне рабочих давлений, температур и проходных сечений.

Использование электромагнитных клапанов продиктовано, прежде всего, долговечностью и надежностью конструкции изделия, связанного с тем что в аналогичных (пневмоприводных и электромеханических) клапанах с подобными техническими параметрами, используется сальниковое уплотнение в выдвижном рабочем штоке, который не может обеспечить требуемую долговременную надежную герметизацию внутренней полости

относительно внешней среды, вызванных большим износом деталей штока и сальника. Ещё одним недостатком подобных гидроприводов является большая инерционность процесса закрытия клапана, связанная со скоростью срабатывания передаточного механизма в электромеханическом приводе. В электромагнитном клапане сальниковое уплотнение отсутствует, а герметичность обеспечивается разделительной втулкой.

Деталь «Втулка» электромагнитного запорного клапана (рис. 1) состоит из разнородных материалов, продиктованных конструктивной необходимостью изделия. Деталь изготавливают из сварной конструкции, которая включает в себя: 1 – сталь 45; 2, 4 – нержавеющая сталь; 3 – магнитная сталь.

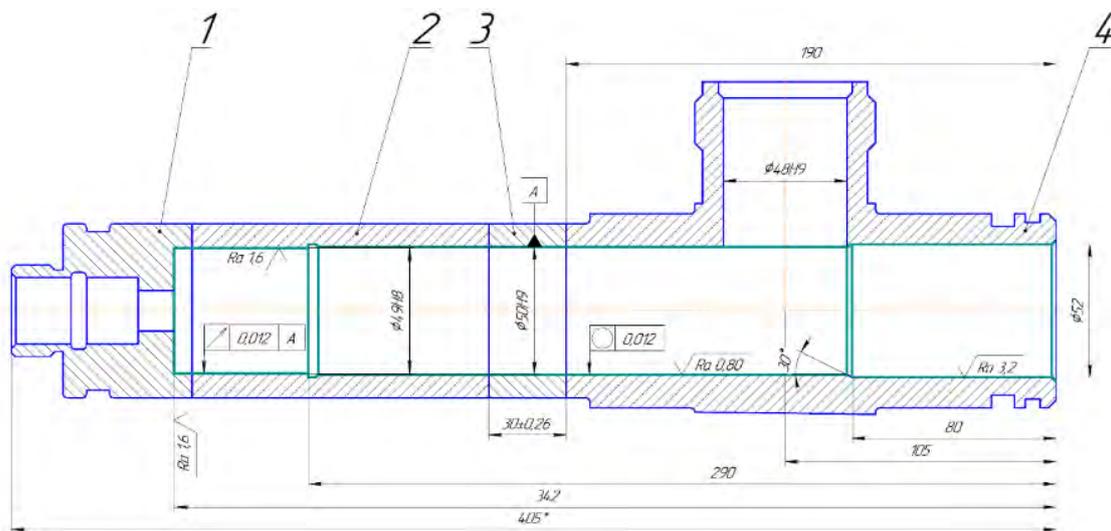


Рисунок 1 – Деталь «Втулка» запорного электромагнитного клапана

К ней предъявляются следующие жёсткие требования по качеству внутренней поверхности (рис. 1).

Предварительные результаты исследования, проведенные на предприятии ООО «НПП Орион» производились на горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300C с использованием антивибрационного инструмента Silent Tools от компании Sandvik с глубиной резания  $t=0,4$  мм, оборотами шпинделя  $n=650$  об/мин и подачей  $S=0,08$  мм/об. При растачивании детали «Втулка» возникли ряд проблем, связанных с разнородностью сварной конструкции. Так при переходе инструмента из одного материала в другой интенсивность колебаний возрастает (рис. 2а), что характеризуется задирами и возникновением глубоких рисок на зеркале детали «Втулка», затем при переходе границы раздела двух материалов процесс стабилизируется, но поскольку геометрия пластины была выбрана с учётом обработки нержавеющей стали, на участке из магнитной стали возникают участки с высокими значениями шероховатости (рис. 2б). Это явление объясняется, во-первых, различной обрабатываемостью двух материалов (1 – сталь электротехническая нелегированная ГОСТ 2590-2006,

2 – сталь нержавеющая 12Х18Н10Т), во-вторых особенностью выбранного инструмента для растачивания такого отверстия.

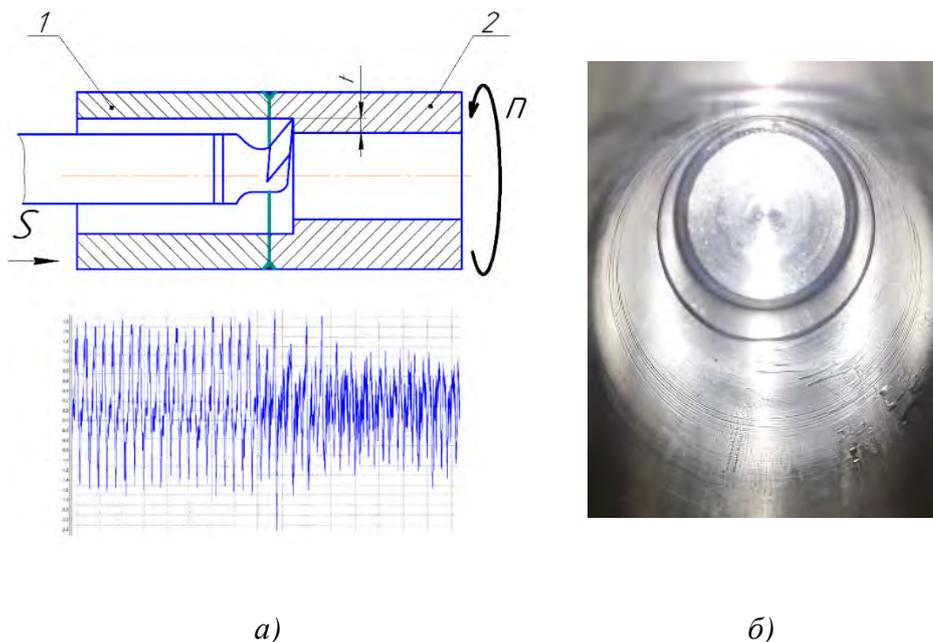


Рисунок 2 – *а* – Схема и результаты испытаний, при растачивании разнородных материалов; *б* – Глубокие риски на участке из магнитной стали

При обработке такой разнородной конструкции, не обеспечивается стабильность процесса резания. Возникают силы резания, значительно отличающиеся на каждом из участков, что приводит к потере точности на участке с лучшей обрабатываемостью, за счёт меньшей радиальной составляющей силы резания, чем на первом участке. Растачивание производилось специальной расточной оправкой Silent Tools, в основе которой используется одномассовый демпфер, подвешенный на эластичных кольцах, пространство между корпусом и демпфером заполнено специальной жидкостью. Однако при нестабильном резании эффективность такого инструмента резко падает. Это связано с тем, что инерционное тело не успевает войти в противофазу с колебаниями конца оправки, тем самым не происходит подавление колебаний, а зачастую являются следствием значительного увеличения его интенсивности. Как результат на границе раздела двух разнородных материалов, существует участок с задирами.

Нами был создан прототип режущего инструмента для растачивания глубокого отверстия (рис. 3), который позволяет решить эту проблему. Корпус оправки *б* представляет из себя цилиндр с осевым отверстием под стрежень крышки, один конец которого закреплен в револьверной головке через разрезную втулку для наилучшего закрепления на станке, а другой – состоит из отверстия конусности 1:30 и полости для установления тарельчатых пружин. Крышка и корпус оправки представляет из себя торцевой кулачковый механизм с двумя участками одинаковой высоты, где ведущим звеном является крышка, а ведомым – корпус оправки.

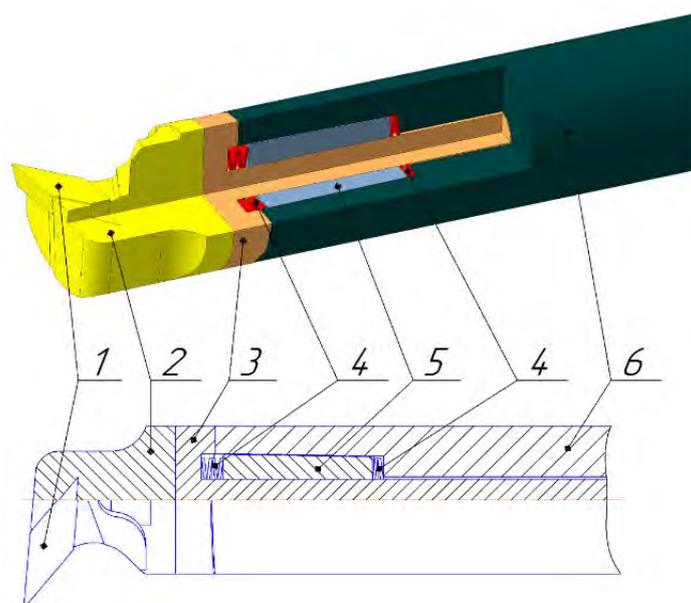


Рисунок 3 – Прототип расточной оправки

Кулачковый механизм позволяет снизить часть крутильных колебаний, возникающих в процессе резания крутящим моментом  $M_z$ , за счёт момента кручения  $M_{кр}$ , образованного путём затяжки гайки на стержне крышки оправки на противоположном конце инструмента; а другая часть вибраций, которая превратилась в продольные вибрации, возникших при перемещении крышки оправки вдоль оси корпуса оправки, демпфируется посредством сухого трения тарельчатых пружин и конуса о стержень крышки оправки. Такое напряженно-деформированное состояние, позволяет значительно увеличить чувствительность системы к различного рода колебаниям. Это позволит непрерывно растачивать все участки детали «Втулка», которая состоит из разнородных материалов.

Разработка новой технологии позволит уменьшить трудоемкость по наладке станка, увеличит безопасность процесса, путём сокращения инструментального оснащения для чистовой обработки и сократит количество предварительных чистовых операций, тем самым уменьшив машинное время станка, а высокие демпфирующие свойства инструмента позволят провести размерно-чистовую обработку лезвийным токарным инструментом, оснащённым твёрдосплавной пластинкой.

#### Список использованных источников

1. Баранчиков, В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др.; Под общ. ред. В.И. Баранчикова – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
2. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С.А. Васин – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с.
3. Осминко Д.А., Максаров В.В. Совершенствование технологии изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров на основе

виброустойчивой инструментальной системы / «Труды Международной научно-технической конференции «МТЕТ-2016». – Санкт-Петербург, 2016.

4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 587 с. с ил.

5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. – Т.1. / А.М. Дальский [и др.] – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.

6. Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И. и др. Обработка глубоких отверстий. – Л.: Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1988. – 269 с.

УДК 004.94

## **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕСТИРОВЩИКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

*В.Б. Таранчук*

*Белорусский государственный университет*

*e-mail: taranchuk@bsu.by*

Построение цифровых геоэкологических, геологических моделей является обязательной составляющей экспертных заключений в ряде сфер деятельности, в частности, при организации государственного мониторинга состояния окружающей среды, недр, в задачах рационального использования минерально-сырьевой базы, в проектах защитных мероприятий, связанных с описанием рельефа и инженерно-геологического строения местности, при планировании строительства промышленных объектов. Особую роль геологические модели имеют при обосновании проектов размещения объектов энергетики. Геоэкологическое, геологическое моделирование является самостоятельным направлением, которое предполагает развитие математических методов и алгоритмов; разработку компьютерных программ, обеспечивающих цикл построения моделей, формирования, наполнения и сопровождения баз данных. Программные средства должны обеспечивать предобработку и интерактивный анализ данных, корреляцию, формирование цифровых кубов данных, визуализацию с применением графики разных типов, картопостроение. Одной из важнейших составляющих в геологическом моделировании является задача оценки адекватности и точности предлагаемых цифровых моделей, ключевыми являются вопросы автоматизации настройки, адаптации моделей с учетом постоянно поступающих дополнительных данных, а также ревизии результатов обработки исходной информации с использованием новых методов интерпретации.

Программирование, реализация алгоритмов построения и адаптации геоэкологических моделей трудоемко, предполагает использование уникальных математических методов. Представляется, что в настоящее время при создании компьютерных геологических моделей более эффективным, обеспечивающим заметно более низкие трудозатраты и относительно быстрым по времени будет подход, основанный на сочетании и интеграции в единый программный комплекс модулей современных версий систем

компьютерной алгебры (СКА) и географических информационных систем (ГИС). При этом следует понимать, что для решения задач обработки исходных данных, в частности, результатов дистанционного зондирования, сейсмо- и магниторазведки, моделирования никакая конкретная ГИС не является полным набором пространственно-аналитических методов и средств анализа. Во многих случаях приходится комбинировать инструменты ГИС с программами статистического анализа данных, средствами для математически сложных вычислений, включающих реализации современных методов и алгоритмов анализа и интерпретации пространственных данных.

В работе [1] изложены предложенные и реализованные методические, технические и организационные решения создания программного комплекса ГГМЗ, описаны и проиллюстрированы примерами инструменты автоматизированного рабочего места специалиста, который в вычислительных экспериментах может выполнять подготовку эталонов, анализ и адаптацию цифровых полей применительно к задачам формирования геологических и геоэкологических моделей. Разработанная интегрированная компьютерная система дает возможности манипулирования исходными данными, сопоставления цифровых моделей, формирования библиотек эталонов, подготовки тестовых наборов данных для возможных интерпретаций экспертов, анализа получаемых разными способами результатов. В программном комплексе ГГМЗ реализованы следующие средства:

- инструменты и шаблоны для подготовки эталонной модели цифрового поля, отвечающего оговоренным свойствам («Конструктор цифрового поля»);
- средства и несколько вариантов модулей «искажения» эталонной модели;
- инструменты имитации «съема» данных, которые используются в практике моделирования («Генератор профиля наблюдения»);
- модули расчета, визуализации, сопоставления аппроксимирующих цифровых полей несколькими разными методами (компонент «Аппроксимация»);
- инструменты и модули адаптации («доводки») формируемой цифровой модели (компонент «Адаптация»).

Следует понимать, что создание и сопровождение геоэкологической модели не предполагают нахождение единственного решения некоторой математической задачи. Субъективное мнение, квалификация эксперта – факторы, всегда присутствующие в подобной деятельности. При создании моделей приходится оперировать с данными, точность которых различна, а некоторые исходные данные вовсе противоречивы; на разных участках плотность данных наблюдений значительно различается. Поэтому для построения цифровых моделей важно иметь инструменты интерактивной обработки данных, имитации возможных ситуаций получения и коррекции входной информации, включая дополнение и прореживание, модули математической обработки и статистического анализа. Все этапы работы с данными в комплексе включают разнообразные варианты графической визуа-

лизации, протоколирование и сопоставление получаемых или помещенных в архив результатов. Инструменты разработанного и обсуждаемого в докладе комплекса ГГМЗ обеспечивают пользователя возможностями «поиграть» исходными данными и сопоставить результаты с подготовленными эталонами, возможности извлечения и дополнения библиотеки эталонов, причем, оператор системы обеспечен средствами импорта и экспорта данных и изображений, масштабирования. Широкие возможности обмена данными важны для одновременной работы в нескольких программных средах.

**Основные инструменты визуализации моделей.** В комплексе ГГМЗ реализованы более десяти вариантов 1D, 2D и 3D графики, соответствующие инструменты описаны в [2 - 4]. В частности, в комплексе есть модули получения и оформления карт и вставок на них (выкопировок), графиков на профилях, 3D визуализации возможных разрезов (вертикальные, горизонтальные), простых и сложных отсечений. При рассмотрении и анализе эталонные распределения контролируемых характеристик модели могут искажаться добавлением разных возмущений, в том числе с имитацией погрешностей измерений, регулярных и случайных шумов. Важно, что рассматриваемые распределения на первом этапе имеют полное математическое описание (графическая визуализация может быть сделана с любой требуемой точностью, в любом масштабе).

**Визуализация профилей.** Поясняются возможности получения в комплексе графиков геологических профилей. Отмечены основные варианты интерфейса. В приведенных примерах детализация распределения контролируемых характеристик осуществляется визуализацией с использованием 2D и 1D графики, показан вариант визуализации с использованием 3D и 1D графики.

**Визуализация разрезов, сечений.** В комплексе ГГМЗ есть интерактивные модули с панелями указания значений координат для 3D визуализации возможных разрезов (вертикальные, горизонтальные), отсечений (простые и сложные). Средства комплекса позволяют, зафиксировав какую-либо конфигурацию секущих плоскостей, просматривать 3D модель объекта интерактивно, меняя ракурс, масштаб, относительное положение; примеры соответствующих настроек приведены в [3, 4].

Конечно же, в число инструментов визуализации моделей входят карты изолиний и зон (плотности), примеры которых приведены в докладе.

**Инструменты имитации сбора данных и картопостроения.** При создании геоэкологических, геологических моделей основными источниками данных являются результаты дистанционного зондирования, сейсморазведки, грави- и магниторазведки. Направлением совершенствования технологии дистанционного зондирования является разработка и обоснование метода адресного уплотнения сейсмических профилей, трасс наблюдений. В докладе проиллюстрированы примерами средства генератора профиля наблюдения комплекса, которые могут использоваться при оценках эффектов оптимизации сети сейсморазведочных профилей, трасс наблюдений.

Рассматриваются варианты «ручной» работы (эксперт интерактивно определяет схему), и в автоматическом режиме, когда исполняющий модуль компонента «Адаптация», обрабатывая определенную исходную информацию, предлагает на выбор несколько вариантов схем наблюдений.

Резюмируя результаты можно отметить, что разработанная интегрированная компьютерная система дает возможности манипулирования исходными данными, сопоставления цифровых геологических моделей, формирования эталонов, подготовки наборов данных для возможных интерпретаций экспертов, анализа получаемых разными способами результатов.

#### **Список использованных источников**

1. Таранчук В.Б. Интегрированный программный комплекс тестирования геологических моделей / В.Б. Таранчук // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2017. – № 16 (265) том 43. – С. 148-159.

2. Таранчук В.Б. Графический сервис вычислительного эксперимента: учеб.-метод. пособие / В.Б. Таранчук. – Минск: БГУ, 2009. – 124 с.

3. Таранчук В.Б. Особенности функционального программирования интерактивных графических приложений / В.Б. Таранчук // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия, раздел Математика. – 2015. – № 6 (128). – С. 178-189.

4. Taranchuk V.B. Development of interactive teaching materials for computer mechanics / V.B. Taranchuk, M.A. Zhuravkov // Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform. – 2016. – No. 3. – P. 97-107 (in Engl.).

УДК 621.039(083.75)

### **РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА**

*В.В. Сорокин*

*Белорусский национальный технический университет*

Для повышения противоаварийной устойчивости и безопасности современной АЭС с ВВЭР решающим элементом оказывается четвертый барьер – локализирующая система безопасности, с основным элементом – герметичным объемом. Для защиты барьера необходимо решить проблему, связанную с выходом большого количества водорода под оболочку при тяжелой аварии с возможностью воспламенения и взрыва [1–4].

Водород удаляют при помощи пассивных рекомбинаторов водорода [5, 6]. Для экспериментальной проверки работоспособности устройств невозможно создать среду адекватную аварийной, поэтому моделирование приобретает исключительно важное значение [3, 5, 7].

В качестве конкретного объекта моделирования выбран рекомбинатор с катализатором нанесенный на пластины фирмы Арева [5, 6]. Рекомбинатор состоит из металлического корпуса и кассеты. В кассете установлен ряд параллельных пластин, покрытых слоем платинового катализатора.

Корпус открыт сверху и снизу в атмосферу. При наличии водорода в атмосфере, он попадает на пластины, последние разогреваются, повышается температура окружающей газовой среды и начинается естественная циркуляция атмосферы через аппарат. На выходе формируется струя нагретого газа с пониженным содержанием водорода.

Работу рекомбинатора сопровождает множество сложных значимых факторов: событий и условий, меняющихся со временем [1, 2, 4, 7], примером их учета на практике могут служить документы [8, 9]. Детальнее факторы рассматриваются при составлении и анализе отчета по безопасности блока АЭС. Данное исследование посвящено оценке теплового эффекта и производительности рекомбинатора.

Создана теплогидродинамическая модель рекомбинатора водорода в составе щелевых каналов со стенками, покрытыми катализатором и тягового корпуса. В модели учтены процессы теплоотдачи от стенки к газу, диффузионный обмен веществами между течением и стенками, реакция между кислородом и водородом на поверхности платинового катализатора. Влияние свободной конвекции на коэффициент теплоотдачи учтено по [10], кинетики химической реакции по [11], тяга вычисляется по балансу сил Архимеда и сопротивления, причем коэффициент сопротивления установлен с использованием данных [6]. Параметр скорости химической реакции получен с использованием экспериментальных данных РЕКО-3 [12].

Расчетом установлено, что температура выхлопной струи из рекомбинатора при объемной концентрации водорода 2% и более превышает 240 °С; содержание водорода составляет 17–33% от исходного. Производительность рекомбинаторов при аварийных параметрах среды не ниже заявленных изготовителем и проектантом. Производительность линейно растет с ростом объемной концентрации водорода в среде. Новизна заключается в детализации теплового эффекта и независимом подтверждении производительности рекомбинатора, установленной линейности характеристики рекомбинатора.

Результаты будут использованы при анализе отчета по безопасности блоков Белорусской АЭС на стадии эксплуатации. Результаты могут использоваться при анализе тяжелых аварий с течами ВВЭР, PWR и LWR.

#### **Список использованных источников**

1. Безлепкин В.В. Обеспечение водородной безопасности АЭС с ВВЭР-1000 / В.В. Безлепкин и [др.] // Теплоэнергетика, 2002. – №5. – С. 5-12.
2. IAEA safety related publications. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661. – Vienna: IAEA, 2011. – 174 p.
3. Велькер М. Инновационные технологии для обеспечения безопасности АЭС, как следствие аварии на АЭС Фукусима / М. Велькер // 7-я международная выставка и конференция Атомэкспо-Беларусь 2015: официальный каталог, Минск, 22 – 24 апреля 2015 / РУП НВЦ «БелЭкспо». – Мн., 2015. – 86 с. – С. 59.

4. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И.А. Кириллов и [др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2 (84). – С. 1–12.

5. AREVA Passive Autocatalytic Recombiner / Brochure: AREVA GmbH – Paul-Gossen-Straße 100 – 91052 Erlangen. – Germany. – 2013. – G-008-V3-13-ENGPB.

6. Passive Autocatalytic Recombiner / – Mode of access: [www.us.aveva.com](http://www.us.aveva.com). – Date of access: 11.08.2016.

7. Understanding of the operation behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water nuclear Reactor (LWR) accident/ F. Payota [et al] // Nuclear Engineering and Design. – July 2012. – Vol. 248. – P. 178–196.

8. Техническое задание на закупку системы аварийного удаления водорода из ГО РУ для энергоблоков № 3 и № 4 Нововоронежской АЭС. – УТВ. 04.07.2013. – Нововоронеж: НВАЭС, 2013. – 10 с.

9. Национальный отчет о результатах проведения «стресс-тестов» / Государственная инспекция ядерного регулирования Украины. – Киев: ГИЯРУ, 2011. – 136 с.

10. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справоч. пособие / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

11. Химическая гидродинамика: справоч. пособие / А.М. Кутепов и [др.]. – М.: Бюро Квантум, 1996. – 336 с.

12. Modelling of Catalytic Recombiners: Comparison of REKO-DIREKT Calculations with REKO-3 Experiments / E.-A. Reinecke et [al] // Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe. – Bled, Slovenia, September 5–8, 2005. – Paper 92.

УДК 681.51.(075.8)

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ТИПОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА**

*Г.Т. Кулаков, Н.Б. Карницкий, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, К.И. Артёменко  
Белорусский национальный технический университет*

Структурная схема типовой системы автоматического управления мощностью энергоблока (САУМБ) и ее упрощенной модели приведена на рис. 1 [1].

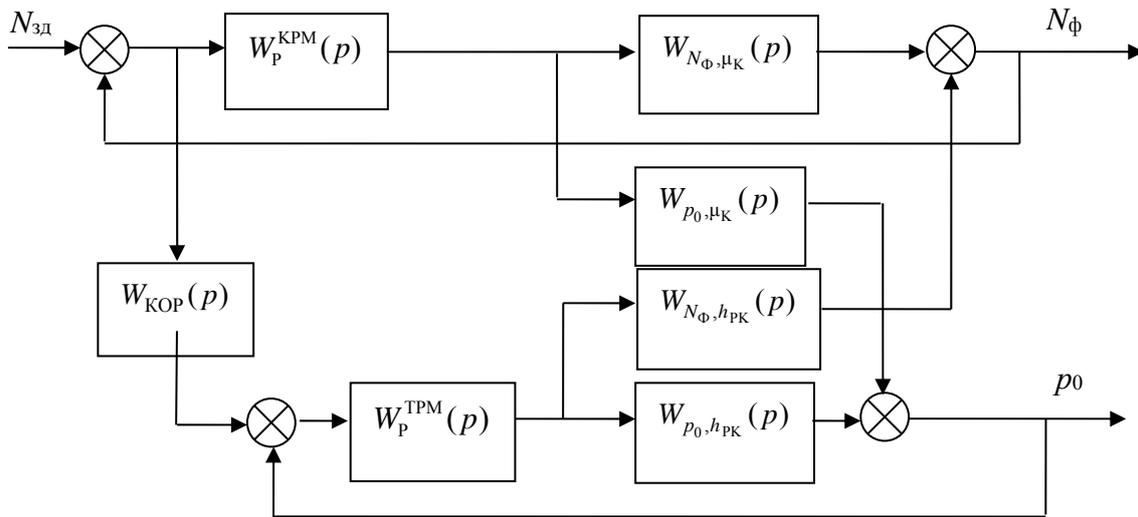


Рисунок 1 – Структурная схема типовой САУМБ

Ведущим в САУМБ является котельный регулятор мощности, поэтому главной обратной связью системы будем считать обратную связь контура котельного регулятора. Структуру САУМБ с разомкнутой обратной связью по контуру котельного регулятора мощности будем называть разомкнутой САУМБ.

Структурную схему разомкнутой САУМБ можно представить в виде двух параллельно включенных каналов: канала котельного регулятора мощности (КРМ) и канала турбинного регулятора мощности (ТРМ).

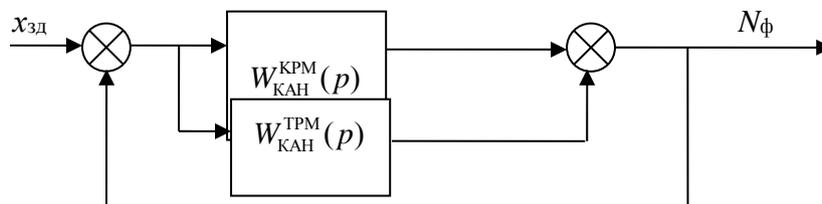


Рисунок 2 – Структурная схема упрощенной модели САУМБ

Здесь  $W_{КАН}^{KPM}(p)$  и  $W_{КАН}^{TPM}(p)$  – передаточные функции каналов котельного (КРМ) и турбинного регуляторов (ТРМ) мощности соответственно.

Разделение структурной схемы типовой САУМБ на каналы КРМ и ТРМ выполнено путем переноса входного сигнала передаточной функции  $W_{p0,пк}(p)$  через передаточную функцию котельного регулятора мощности, т.е. на вход  $W_p^{KPM}(p)$ .

Представление структурной схемы типовой САУМБ в виде ее эквивалентной, но упрощенной схемы позволяет понять роль и влияние корректора  $W_{КОР}(p)$  на качество переходных процессов при отработке задающих воздействий по мощности  $N_{зд}$  и оценить предельные возможности САУМБ.

Моделирование переходных процессов в типовой САУМБ и ее упрощенной модели (рис. 2) подтвердили адекватность их динамики (рис. 3 и 4).

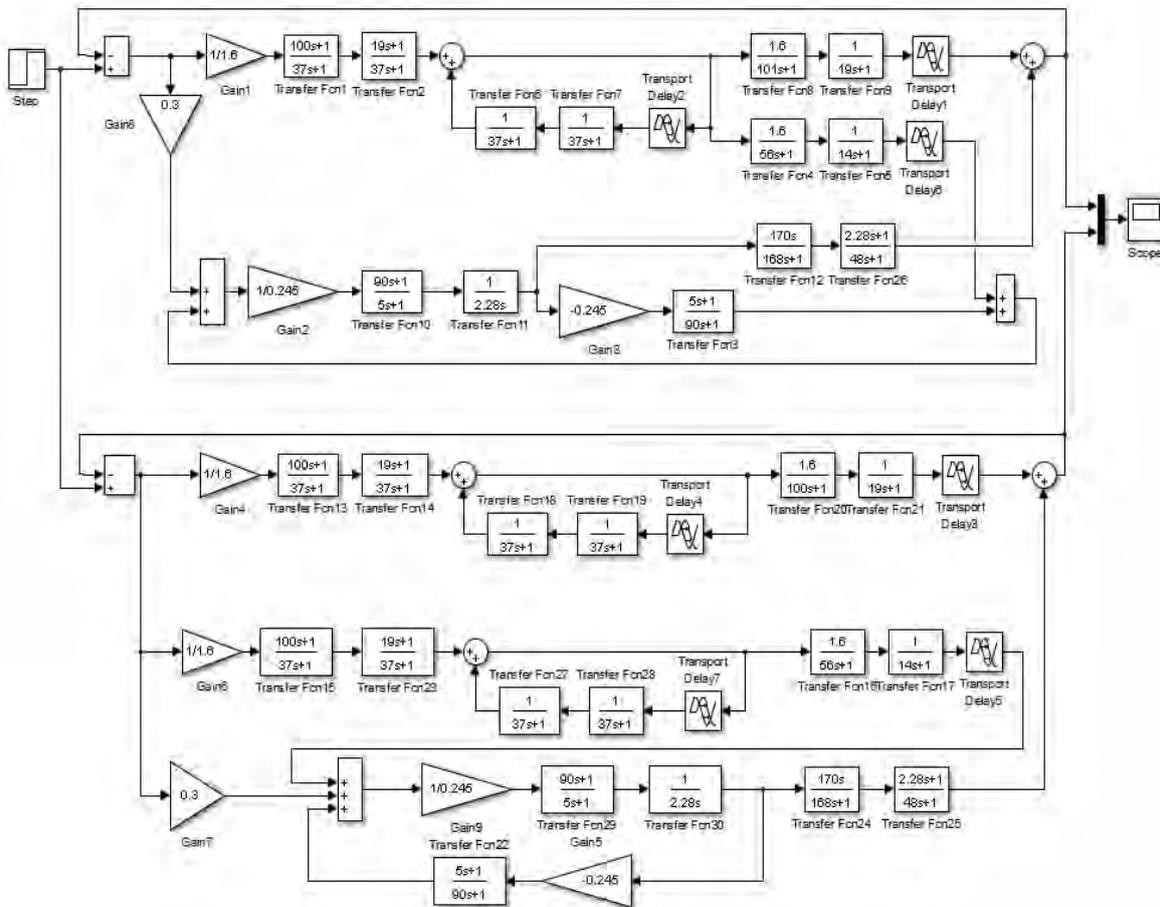


Рисунок 3 – Схема моделирования типовой САУМБ и ее упрощенной модели

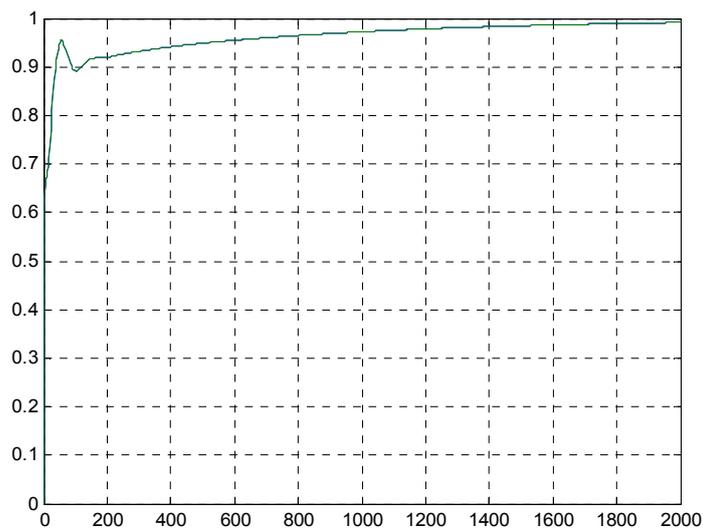


Рисунок 4 – Переходные процессы в типовой САУМБ и ее упрощенной модели при обработке скачка задающего воздействия

Исследования показали, что переходная характеристика канала ТРМ может быть представлена инерционно-дифференцирующим звеном.

### **Выводы**

1. Моделирование типовой САУМБ при обработке задающего воздействия  $N_{зд}$  и упрощенной схемы САУМБ показало допустимость оценки предельных возможностей типовой САУМБ по ее упрощенной модели.

2. Передаточная функция корректора  $W_{кор}(p)$  в типовой схеме САУМБ может быть представлена только усилительным звеном  $W_{кор}(p) = \alpha$ .

Однако в этом случае при увеличении значения параметра  $\alpha$  получаем приемлемый рост мощности на начальном этапе переходного процесса, но время регулирования велико (переходной процесс затянут).

3. Существенно повысить возможности типовой САУМБ можно только при «компенсации» передаточной функции  $W_{p_0, \mu_k}(p)$ . Это устраняет взаимозависимость каналов КРМ и ТРМ и позволяет применять более сложные виды передаточных функций корректора  $W_{кор}(p)$ , что позволяет существенно улучшить качество переходных процессов в системе автоматического управления мощностью энергоблока.

### **Список использованных источников**

1. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. Пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.: ил.

УДК 621.1:681.51.01 (075.8)

## **ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР С ЗАДЕРЖКОЙ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

*Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, К.И. Артёменко  
Белорусский национальный технический университет*

Для качественного регулирования теплоэнергетических объектов с большим запаздыванием применяют предиктивные пропорционально-интегральные (ППИ) регуляторы, являющиеся модификацией предиктора Смита, а также ПИ-регуляторы с динамическим корректором [1].

Для повышения качества регулирования теплоэнергетических объектов и уменьшения влияния интегрального накопления предлагается использовать ПИ-регулятор с задержкой подключения интегральной составляющей для объектов с запаздыванием, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_p^{ПИ} = \frac{e^{-\tau_p p}}{T_i p} + k_p, \quad (1)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи;

$T_i$  – время интегрирования регулятора, являющегося модификацией предиктивного ПИ-регулятора;

$\tau_p$  – время задержки подключения интегральной составляющей регулятора.

Пусть передаточная функция объекта равна:

$$W_{об} = \frac{K_{об} \cdot e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1}, \quad (2)$$

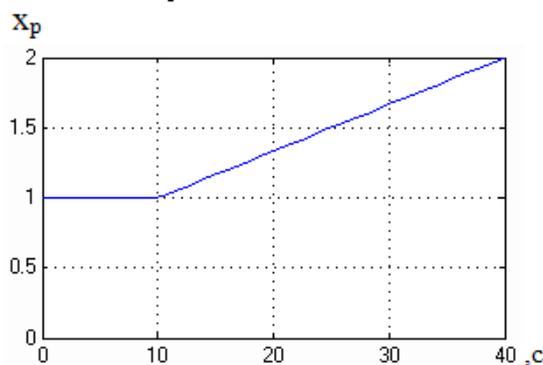
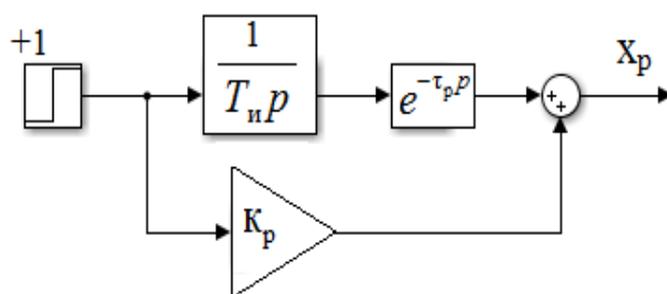
где  $K_{об}$  – коэффициент передачи;

$T_k$  – постоянная времени;

$\tau_y$  – условие запаздывания по каналу регулирующего воздействия [1].

Целесообразно время задержки подключения интегральной составляющей регулятора  $\tau_p$  принять равной условному запаздыванию  $\tau_y$ .

Построим переходную характеристику регулятора (1):



а)

б)

Рисунок 1 – Характеристики предиктивного регулятора:  
а – схема моделирования; б – график переходной функции

Запаздывание  $e^{-\tau_p p}$  в передаточной функции регулятора (1) представим в виде ряда Тейлора, ограничившись в разложении лишь двумя первыми членами [2]:

$$e^{-\tau_p p} \approx 1 - \tau_p p. \quad (3)$$

Передаточная функция регулятора (1) с учетом (3) принимает вид:

$$W_p^{\text{ПИ}}(p) = \frac{e^{-\tau_p p}}{T_i p} + K_p = \frac{e^{-\tau_p p} + K_p T_i p}{T_i p} = \frac{1 - \tau_p p + K_p T_i p}{T_i p} = \frac{(K_p T_i - \tau_p)p + 1}{T_i p}. \quad (4)$$

Это ПИ-регулятор с независимыми параметрами динамической настройки. Передаточная функция разомкнутой системы с учетом (1), (2) и (3) примет вид:

$$W_{\text{pc}}(p) = W_p^{\text{ПИ}}(p)W_{\text{об}}(p) = \frac{e^{-\tau_p p} + K_p T_i p}{T_i p} \cdot \frac{K_{\text{об}} \cdot e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1} \approx \frac{(K_p T_i - \tau_p)p + 1}{T_i p} \cdot \frac{K_{\text{об}} \cdot e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1}. \quad (5)$$

Выбор параметров динамической настройки регулятора выполним из условия получения монотонного переходного процесса в замкнутой системе при отработке скачка задания, чтобы передаточная функция разомкнутой системы представляла собой интегрирующее звено с запаздыванием.

Передаточная функция разомкнутой системы (5) превращается в интегрирующее звено с запаздыванием:

$$W_{\text{pc}}(p) = \frac{K_{\text{об}} \cdot e^{-\tau_y p}}{T_i p} = \frac{e^{-\tau_y p}}{T_i^* p}, \quad (6)$$

$$\text{где } T_i^* = \frac{T_i}{K_{\text{об}}}, \quad (7)$$

$$\text{если выполняется условие: } K_p T_i - \tau_p = T_k. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что коэффициент усиления предиктивного ПИ-регулятора рассчитывают по формуле:

$$K_p = \frac{T_k + \tau_p}{T_i}. \quad (9)$$

Запишем с учетом (6) и (7), передаточную функцию замкнутой системы по задающему воздействию:

$$W_{\text{зс}}(p) = \frac{W_{\text{pc}}(p)}{1 + W_{\text{pc}}(p)} = \frac{\frac{e^{-\tau_y p}}{T_i^* p}}{1 + \frac{e^{-\tau_y p}}{T_i^* p}} = \frac{e^{-\tau_y p}}{T_i^* p + e^{-\tau_y p}} \approx \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_i^* - \tau_y)p + 1} = \frac{e^{-\tau_y p}}{T_{\text{зд}} p + 1}. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что постоянная интегрирования  $T_{и}^*$  должна быть больше времени запаздывания объекта, т. е.  $T_{и}^* > \tau_y$  или с учетом (7):

$$T_{и} > K_{об} \cdot \tau_y. \quad (11)$$

Из передаточной функции (10) с учетом (7) получим:

$$T_{зд} = T_{и}^* - \tau_y = \frac{T_{и}}{K_{об}} - \tau_y. \quad (12)$$

Из (12) формула для расчета постоянной интегрирования  $T_{и}$  предиктивного регулятора имеет следующий вид:

$$T_{и} = K_{об}(T_{зд} + \tau_y). \quad (13)$$

Задавшись численным значением постоянной времени  $T_{зд}$ , рассчитываем по формуле (13) постоянную интегрирования  $T_{и}$  предиктивного ПИ-регулятора и далее по формуле (9) – значение коэффициента усиления  $K_p$ .

Обычно численное значение  $T_{зд}$  рекомендуют выбирать с учетом следующего неравенства:

$$T_{зд} \geq 0,5 \cdot T_k. \quad (14)$$

Пусть объект регулирования (1) имеет следующие параметры:  $k_p = 2$ ,  $T_k = 20$  с,  $\tau_y = 10$  с.

Рекомендуемое минимальное значение  $T_{зд}$  согласно (14) равно:

$$T_{зд} \geq 0,5 \cdot T_k = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ с}. \quad (15)$$

В этом случае время регулирования примерно равно:

$$t_p \approx \tau_y + 4 \cdot T_{зд} = 10 + 4 \cdot 10 = 50 \text{ с}.$$

С учетом (15) минимальная постоянная интегрирования согласно (13) будет равна:

$$T_{и} = K_{об}(T_{зд} + \tau_y) = 2 \cdot (10 + 10) = 40 \text{ с}.$$

Согласно формуле (9) соответствующее значение коэффициента усиления будет равно:

$$K_p = \frac{T_k + \tau_p}{T_i} = \frac{20 + 10}{40} = 0,75.$$

Проверим полученные результаты моделированием, сравнив переходные процессы в САР с предиктивным ПИ-регулятором и эталонной моделью замкнутой системы.

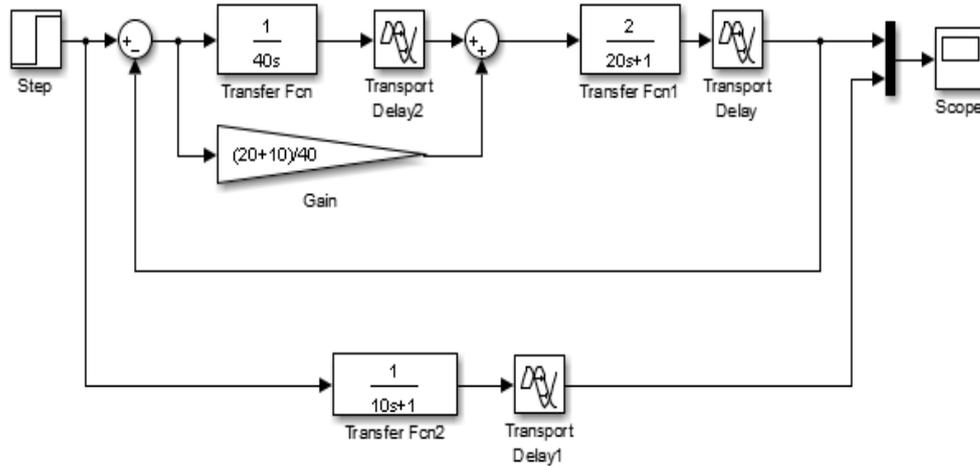


Рисунок 2 – Схема моделирования замкнутой системы с предиктивным ПИ-регулятором (1) и его расчетными параметрами динамической настройки и эталонной моделью

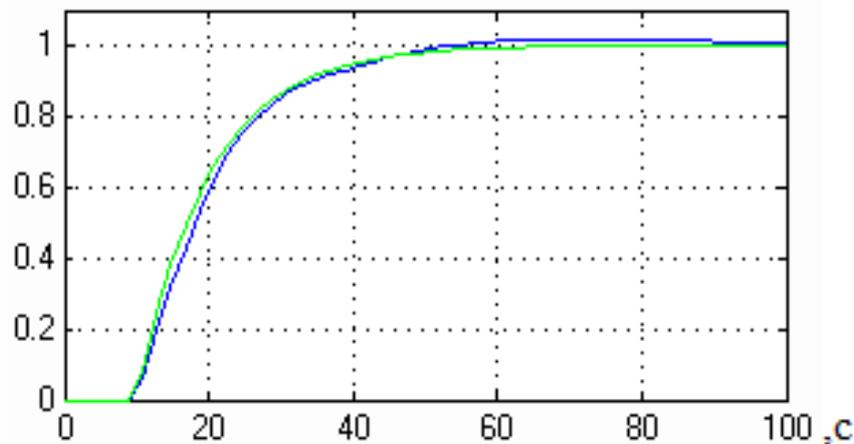


Рисунок 3 – Переходные процессы в замкнутой САР с предиктивным ПИ-регулятором и эталонной моделью

Сравнение графиков на рис. 3 показывает хорошее совпадение переходных процессов.

Сравним переходные процессы в САР с предиктивным ПИ-регулятором и минимальным значением  $T_{зд}$  для монотонного переходного процесса и САР, настроенной по методу модального оптимума для объекта с запаздыванием [3]:

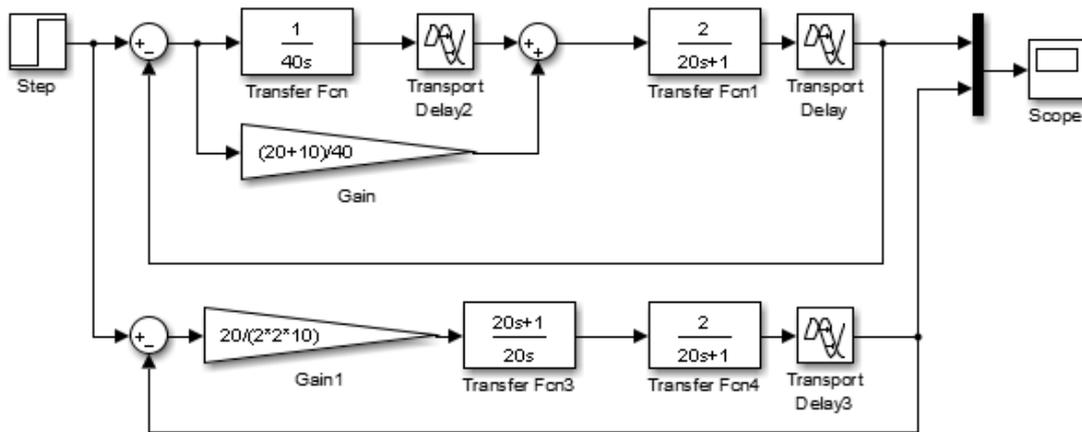


Рисунок 4 – Схема моделирования САР с предиктивным ПИ-регулятором и САР, настроенной методом оптимального модуля

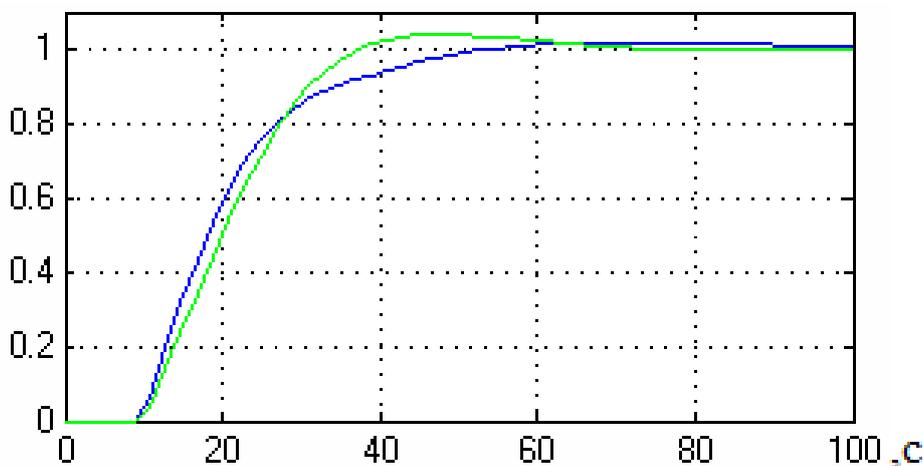


Рисунок 5 – Переходные процессы в САР с предиктивным ПИ-регулятором и САР, настроенной методом оптимального модуля

Сравнение графиков показывает, что оба регулятора обеспечивают примерно одинаковое время регулирования, но оптимальный модуль дает перерегулирование, примерно равное 4,3%.

#### Список использованных источников

1. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.: ил.
2. Ротач В.Я. Расчёт динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.: ил.
3. Кузьмицкий И.Ф. Теория автоматического управления / И.Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 576 с.: ил.

## ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИИ

*А.А. Колотов, А.Н. Терентьев*

На сегодняшний день в России эксплуатируется порядка 350 тыс. км. промышленных трубопроводных систем.

Ежегодно фиксируется около 100 тысяч отказов трубопроводов или примерно 30 миллионов разлитых баррелей нефти в год, из которых 90 % так или иначе связаны с коррозионным износом.

Коррозия – это фундаментальная проблема на протяжении многих десятилетий: это миллиарды недополученной прибыли, ежедневные отказы, разливы нефтепродуктов, заражение почвы, животных, птиц и непоправимый ущерб для окружающей среды [1].

Причин возникновения коррозии довольно много: наличие в металле механических примесей, наличие участков с динамической нагрузкой на трубопровод, агрессивная среда: сера, соль, вода, кислород, безусловно, ускоряют коррозионный процесс [2].

Как показывает практика, наиболее опасна именно внутренняя коррозия, так называемый «канавочный» износ.

На сегодняшний день существует ряд технологий, позволяющих, так или иначе, снизить коррозионное воздействие (ингибирование, футерование, композиционные материалы, и т.д.). Безусловно, каждая из технологий имеет свои достоинства и недостатки. Но, основная задача – разработка метода защиты уже для существующих трубопроводов, без их демонтажа, чтоб не нарушать равновесие ОПС. Кроме того, применяемая технология должна идеально работать с уже существующими способами защиты от коррозии.

При использовании протекторного способа защиты внешний источник тока не требуется, в паре работают два металла, из-за разности потенциалов между ними возникает электрический ток, и частицы металлов в виде ионов переходят к катодным участкам.

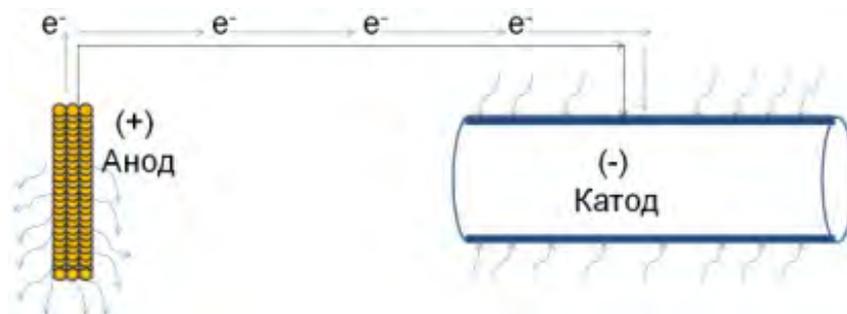


Рисунок 1 – Стандартная схема протекторной электрохимической защиты

Предлагается модернизация стандартной схемы протекторной электрохимической защиты за счет размещения электрода не в грунте, а непо-

средственно внутри трубопровода, используя в качестве электролита транспортируемую жидкость, чтобы в результате окислительно-восстановительной реакции восстановление металла проходило на внутренней стенке трубы.

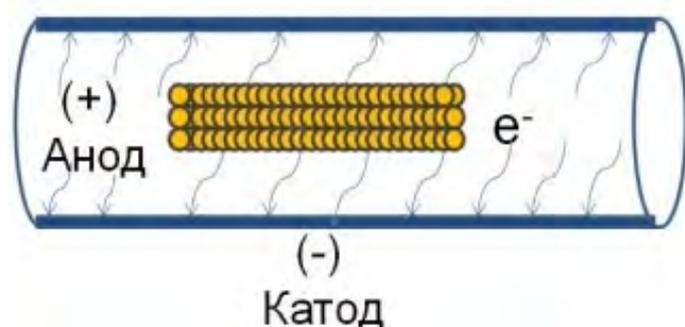


Рисунок 2 – Модернизация схемы протекторной электрохимической защиты

Кроме стандартной электрохимической защиты, при распаде анодного электрода, возможно образование оксида железа  $Fe_3O_4$ , который должен покрывать тонкой пленкой внутреннюю стенку трубы, закупоривая существующие поры, дефекты, микротрещины и препятствовать контакту с агрессивной средой.

Для проверки работоспособности теории, был сконструирован и собран протекторный антикоррозионный модуль.

Следующим шагом был выбор активного металла для обеспечения электрохимической защиты. В промышленности наиболее распространены три типа активных металлов, это цинк, магний, алюминий.

Для оптимального воздействия был создан электрод – алюминиевый сплав с 45% содержанием магния.

По результатам проведения испытаний на дренажной линии РВС-5000 УПН «Киенгоп», были получены данные, характеризующие потерю массы образца-свидетеля и характер коррозионного разрушения.

Целью первого этапа являлось получение значения потери массы образцов-свидетелей в начальный момент, до установки протекторного модуля. Период замера с 4 мая 2016 года по 19 мая 2016 года. Суммарная потеря массы образцов-свидетелей во время фонового замера составила 0,1395г. Коррозионное разрушение выражено в виде язвенной коррозии по всей поверхности образцов-свидетелей. Замер фоновой скорости коррозии снимался трижды.

После установки протекторного модуля, по результатам первого замера, было отмечено уменьшение потери массы образца-свидетеля до 0,0093 г за период с 2 по 16 июня 2016 года. На образцах-свидетелях №710 и №725 выявлены незначительные коррозионные разрушения.

Второй этап ОПИ, проходящий в период с 16 по 30 июня 2016 г., также характерен незначительной потерей массы ОСК (0,0052 г). На об-

разцах-свидетелях №700 и №516 выявлены незначительные коррозионные разрушения.

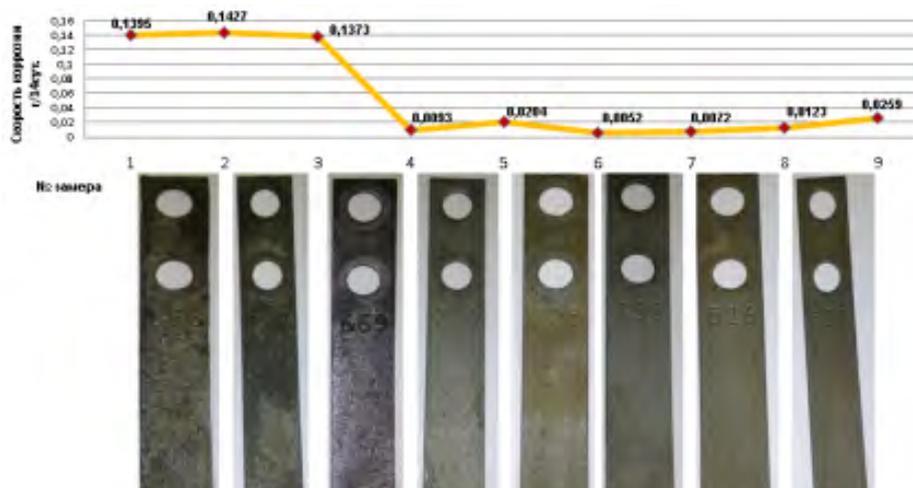


Рисунок 3 – Незначительные коррозионные повреждения на втором этапе ОПИ

Заключительный третий этап ОПИ, проходящий в период с 30 июня по 14 июля 2016 года, характерен в разы меньшей потерей массы ОСК (0,0123 г) и отсутствием видимых изменений на образцах №532.

**Выводы.** После проведения опытно-промышленных испытаний антикоррозионного протекторного модуля можно констатировать, что потеря массы образца-свидетеля коррозии сократилась до 14 раз. Предложенный способ защиты показал свою эффективность. Последующие проведенные опытно-промышленные испытания на участках Роснефть и ООО «РН-Юганскнефтегаз» подтвердили первоначальный результат. На основании результатов подана заявка на патент, положено начало процесса сертификации продукта – электрода.

#### Список использованных источников

1. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей, 2008. – С. 97.
2. Красноярский В.В., Цикерман Л.Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений, 1968. – С 43.

УДК 620.9

### АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

*В.З. Салахутдинова*

*Казанский государственный энергетический университет*

Стоит отметить, что в настоящее время системы исследований по анализу аварийности технических комплексов, которые носят научный характер, и итоги которых уменьшали бы потребность в практике использования крупных систем энергетики, отсутствуют. Нельзя не сказать об актуально-

сти данного направления исследований, так как воздействие обширных технических систем на развитие человечества растёт.

Исходя из итогов осенне-зимнего периода 2016-2017 годов руководитель Федеральной службы экологического, атомного и технологического надзора сообщил, что было зафиксировано 14 аварийных процессов на объектах электроэнергетики, что свидетельствует об уменьшении числа подобных аварий. По итогам 2015-2016 года произошло 23 происшествия, которые были изучены Ростехнадзором [1].

Повреждение оборудования, нарушения изоляции, неверная работа различных устройств и аппаратов, ошибки в рабочем процессе персонала являются следствием аварийных процессов в энергосистеме. Сталкиваясь с вопросом аварийности в электроэнергетических системах, необходимо знать её характеристики:

1) разнородность составляющих элементов. Дифференциация оборудования, строений, имеющих различные производственные характеристики, сроки полезного использования и показатели безопасности;

2) неизменное развитие, модернизирование. Заключается в совершении ремонтных работ, как предусмотренных планом, так и внеплановых. Внедрение новейших составляющих, ввод развивающихся технологических и технических разработок с непрерывным выполнением функций производства;

3) адаптивность к влияниям. В связи с различными видами запасов отклонение одного или же нескольких составляющих электроэнергетической системы способно сохранить работоспособность с условием преобразования некоторых действующих характеристик и критериев;

4) причина вероятностного поведения электроэнергетических систем. Совокупность множества случайных факторов выступает причиной возникновения технологических сбоев в системе, а также влияет на местоположение и особенности протекания нарушения.

В процессе проведения анализа аварийных процессов в энергетике все причины технологических сбоев необходимо дифференцировать на три сегмента:

1) нарушения, которые связаны с техническим состоянием техники, зданий и прочих конструкций, отражают состояние основных производственных фондов и эффективность деятельности элементов всей системы;

2) нарушения из-за ошибок в эксплуатации. Сбои такого рода позволяют оценить уровень процесса организации разработки и степени профессиональной подготовленности персонала;

3) нарушения по причине возникновения опасных внешних факторов – отражают влияние внешней среды на комплекс в целом.

Ключевой целью регулирования электрической системы в аварийном режиме заключается в уменьшении потерь от снижения электропотребления или поломке электрооборудования за счет совершения надлежащей мобилизации источника воздействий и их наиболее приемлемого исполь-

зования. Важна безотлагательная ликвидация источника проблемы и проведения работ против распространения результатов аварии.

Исходя из анализа аварийности, который выявит причины технических ошибок, компоненты системы с большим потоком сбоев и последствия от данных нарушений с учетом возможных рисков, будет выявлен вердикт на управляющее воздействие [2]. Он может влиять на устранение или на снижение воздействия конкретных причин технологических сбоев.

Такие статистические данные, как количество, местоположение, факторы и итоги технологических перебоев, являются исходными в вопросе анализа аварийности в электроэнергетических системах [3]. Несущественные расстройства порой становятся результатами крупных аварий, поскольку технологический перебой с незначительными, на первый взгляд, последствиями способен в других условиях увеличиться в масштабах и усилить неблагоприятные условия.

Владение вероятностно-статистической информацией о технологических кризисах в электроэнергетических системах за длительный период эксплуатации позволит, прибегнув к анализу аварийности, обоснованнее принимать решение по разработке мероприятий связанной с экологической безопасностью объектов энергетики.

Анализ аварийных процессов в энергетике, изучение сбоев и факторов их появления показало, что ключевыми причинами большей части аварий, стали:

1) пониженный уровень организации работы элементов электроэнергетики. Организации, эксплуатирующие данные объекты, несвоевременно и неудовлетворительно осуществляют обслуживание и техническую проверку техники, его ремонт и не осуществляют замену приборов, которые выработали установленные сроки эксплуатации. Примером является авария на Чернобыльской АЭС. Реактор, несоответствующий нормам безопасности имел опасные конструктивные особенности, что привело к крупнейшей в своем роде аварии за всю историю атомной энергетики [4];

2) низкая квалификация руководящего и обслуживающего персонала использующих предприятий. Неспособность быстро оценить ситуацию и предпринять оптимальные действия в сложившейся аварийной ситуации. Так, к примеру, летом 2011 года работник крупной американской АЭС, не вышедший из диагностического режима, вызвал срабатывание автоматического отключения, что привело к веерным отключениям, лишившим света более десяти миллионов человек;

3) внешние факторы, такие как погодные условия. Усиленный ветер, падение деревьев или прочих сооружений, образование замыканий в проводах, крушение опор линий электропередач, связанное с подземными толчками, значительными затоплениями или оползнями. В январе 2012 г. ураганный ветер со скоростью 40 метров в секунду обесточил двести пятьдесят тысяч человек Краснодарского края.

### **Список использованных источников**

1. Брыкова А.И. Энергетическая безопасность России: современное состояние и перспективы развития: сб. тр. Междунар. Науч.-техн. Конф. Молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 3578-3582.

2. Восканян Е. Газеты «Энергетика и промышленность России» №10 (318) май 2017 г. Потенциал снижения аварийности практически исчерпан.

3. Плужник М.В., Сапыркина М.А. Энергетическая безопасность и угрозы ее обеспечения в современной экономике России // Российское предпринимательство, 2013. – №16 (238). – С. 41-50.

4. Воронов С.И., Седнев В.А. Научные образовательные проблемы гражданской защиты, 2016. Авария на Чернобыльской АЭС. Последствия и выводы.

Научное издание

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПАРТНЕРСТВО И УСТОЙЧИВОЕ  
РАЗВИТИЕ СТРАН И ТЕХНОЛОГИЙ**

Сборник научно-технической конференции в рамках  
Форума проектов программ Союзного государства – VI Форума вузов  
инженерно-технологического профиля

24-28 октября 2017 г.

---

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



ТЕХНОПАРК  
СТАРТАП  
БНАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОЕ  
БИЗНЕС  
ГИБЕР



АФИША



СТУДИЯ  
БОРОВОГО



GetClean

ISBN 978-985-583-180-9



9 789855 831809

**Белорусский национальный  
технический университет**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр-т Независимости, 65  
тел.: +375 17 292 77 52  
факс: +375 17 292 91 37  
e-mail: bntu@bntu.by  
www.bntu.by