

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КОММУНАЛЬНОЕ УНИТАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«МИНСКВОДОКАНАЛ»  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«МИНСКОБЛГАЗ»  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«МИНГАЗ»  
РУП «ИНСТИТУТ ЖИЛИЩА - НИПТИС ИМЕНИ АТАЕВА С. С.»**

## **ВОДА. ГАЗ. ТЕПЛО 2020**

**Материалы международной научно-технической конференции,  
посвященной  
100-летию Белорусского национального технического университета,  
100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое  
строительство, водный транспорт и гидравлика»,  
90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
8–10 октября 2020 года**

**Минск  
БНТУ  
2020**

УДК 082(06)  
ББК 74.58я43  
В62

Рецензенты:

кафедра общей физики Белорусского государственного университета;  
главный научный сотрудник ГП «Институт жилища – НИПТИС  
им. С. С. Атаева, доктор технических наук, профессор *В. М. Пилипенко*

Редакционная коллегия:

*Харитончик С. В.* – ректор БНТУ, д-р техн. наук;  
*Маларевич А. М.* – проректор по научной работе БНТУ, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор;  
*Трепачко В. М.* – директор филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», канд. техн. наук, доцент;  
*Ивашечкин В. В.* – декан факультета энергетического строительства БНТУ, д-р техн. наук, профессор;  
*Гуринович В. Ю.* – заведующий отделом научно-технической информации и маркетинга филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»;  
*Линкевич Н. Н.* – доцент кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, канд. техн. наук, доцент;  
*Хрусталева Б. М.* – заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» БНТУ, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор;  
*Качанов И. В.* – заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, д-р техн. наук, профессор;  
*Ануфриев В. Н.* – заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение» БНТУ, канд. техн. наук, доцент;  
*Мартысюк Н. П.* – заведующая кафедрой «Английский язык №2» БНТУ, канд. филол. наук, доцент;  
*Есман А. К.* – заведующий кафедрой «Физика» БНТУ, д.ф.-м.н., профессор;  
*Дячек П. И.* – профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» БНТУ, д-р техн. наук, профессор;  
*Юркевич Н. П.* – доцент кафедры «Физика» БНТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;  
*Корбут О. Б.* – ст. преподаватель кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ;  
*Савченко Ю. А.* – инженер-программист 1 категории кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» БНТУ;

В сборнике представлены материалы Международной научно-технической конференции «Вода. Газ. Тепло 2020», посвященной 100-летию Белорусского национального технического университета, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», тематика которых посвящена актуальным проблемам современной науки и техники в областях водоснабжения и водоотведения, теплогазоснабжения, гидротехнического и энергетического строительства, а также вопросам использования современных технологий преподавания и лингвистического обеспечения образовательного процесса в техническом вузе.

**ISBN 978-985-583-549-4**

© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

**Теплоснабжение, газоснабжение,  
вентиляция и охрана воздушного бассейна**

**Комплексная реализация возможностей получения  
твердого топлива с использованием отходов**

Хрусталёв Б. М.<sup>1</sup>, Пехота А. Н.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Республика Беларусь

*Представлены материалы исследования, выполнен анализ образования горючих отходов в Республике Беларусь. Рассмотрены современные подходы к использованию полимерных отходов, не нашедших технологического применения в других технологиях. Исследованы характеристики их применения в качестве связующего при многокомпонентном брикетировании твердого топлива.*

В настоящее время в Республике Беларусь остро стоит вопрос увеличения объемов использования отходов и создание предпосылок к «нулевому» захоронению отходов. Мировая практика в этой сфере показывает возможность реализации различных технологических решений, среди которых – использование горючих отходов вторичных ресурсов и производство на их основе твердого топлива в виде гранул и брикетов, производство *RDF*-топлива, многокомпонентного твердого топлива (*MTT-MSF* – multi component solid fuel) и др. При этом использование тех либо иных технологических процессов использования отходов зависит от множества факторов. Взаимосвязь морфологического состава, качественных характеристик отходов и оптимальных технологических решений позволяющих получать качественное топливо, основанных на экономически выгодных составляющих применения той или иной технологии в различных направлениях технологии, требует научного обоснования, что позволяет оптимально использовать ресурсы при обращении с отходами [1].

Так, например, объем образования твердых коммунальных отходов (далее – ТКО) в Республике Беларусь оценивается на уровне 3,8 млн. т, из которых около 75 % составляют отходы потребления (от населения) и около 25 % – подобные им отходы производства (от объектов социального, культурно-бытового назначения и т.п.).

В 2019 году из ТКО было извлечено более 714,3 тыс. т вторичного сырья (далее – ВС), что составило около 20 % от объема их образования. Остальной объем отходов был захоронен на полигонах.

Таким образом, необходимо проведение дополнительных исследований по объемам образования горючих отходов вторичных ресурсов в Республике Беларусь с выработкой рекомендаций по их эффективному использованию.

Так состав коммунальных отходов значительный объем отходов составляют полимеры. Учитывая, что многие технологии в целях создания высококачественной продукции очень требовательны к сырьевым ресурсам, применяемым при производстве, не допускают в составе определенных видов отходов. Так по экспертным оценкам, упаковочные пленки, собираемые в торговых объектах (около 20 % объемов отходов полиолефиновой группы), перерабатываются на 90–95 %, твердая упаковка (емкости, около 20 % объемов) – на 55–60 %, то пленка из состава смешанных ТКО (около 25 % объемов) перерабатывается на 20–25 %, полипропиленовая упаковка (мешки, около 10 процентов) – на 20 %, а агропленки (около 20 % объемов) – на 10–15 %.

Безусловно за последние годы в Республике Беларусь имеются достаточные мощности по переработке отходов ПЭТ, а также чистых отходов полиолефиновой группы (пленок и емкостей). Мощности по переработке загрязненных отходов полиолефиновой группы в последние годы активно развиваются на таких предприятиях, как ОАО «Белвтрополимер», ОАО «БЗПИ».

Однако в мировой практике кроме собственно переработки отходов полимеров применяются технологии их использования для получения тепловой и (или) электрической энергии на мусоросжигательных заводах, цементных заводах, ТЭЦ и в качестве связующих компонентов при производстве брикетированного топлива.

Разработанные авторами технологии многокомпонентного брикетирования позволяют получать твердое топливо не только с использованием древесных и углеродсодержащих отходов, но и из смеси отходов ила очистных сооружений с растительно-древесными отходами, отходов животноводства (птицеводства) с сельскохозяйственными отходами и т.п. [2].

При изучении процесса многокомпонентного брикетирования следует различать факторы физические, химические, связанные со свойствами, состоянием брикетируемого материала и применяемым связующим и факторы механические, связанные с конструкцией применяемого брикетировочного оборудования.

Качество брикетов зависит от многих факторов, основными из которых являются: химический и морфологический состав, а также физическое состояние брикетируемого материала, его насыпной вес, влажность, фракционный состав и величина брикетируемых частиц, температура нагрева перед брикетированием, удельное давление брикетирования, а для некоторых материалов, применяемых в составе топлива и технологических процессах

качественные характеристики формируются и временем выдержки под давлением.

Для установления влияния на изменение зависимости от добавления отходов полимеров на основные факторы формирования механической прочности и другие показатели качества брикетов авторами были проведены экспериментальные исследования, результаты которых приводятся ниже.

Эксперимент по определению влияния высоты брикетов на их прочность проводились в лабораторных условиях на гидравлическом прессе с применением закрытой матрицы. Во всех исследованиях принималось одинаковое удельное давление  $p = 20$  МПа.

По результатам опытов на рисунке построен график, из которого видно, что с увеличением высоты брикета  $\sigma_{изг}$  уменьшается. Значительное падение  $\sigma_{изг}$  наблюдается при увеличении высоты в интервале от 10 до 30 мм. В дальнейшем интенсивность изменения  $\sigma_{изг}$  уменьшается.

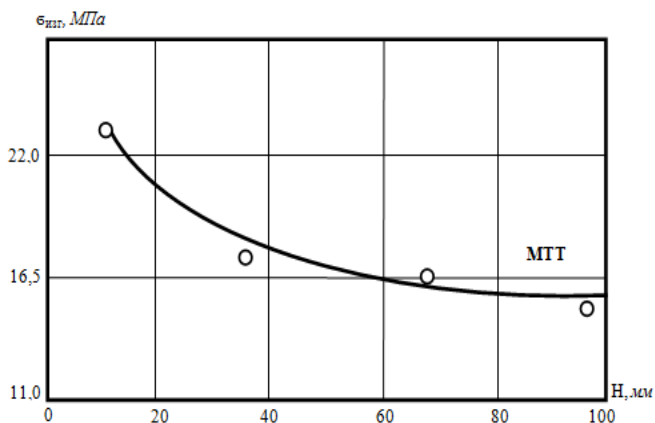


Рис. Влияние высоты брикетов его прочность  $\sigma_{изг}$ :

МТТ – многокомпонентное твердое топливо из хвойных опилок (фракция 0,5–3 мм) с использованием в составе полимерных отходов

Исходя из полученных результатов исследований следует рекомендовать высоту брикетов 15–30 мм при брикетировании многокомпонентного твердого топлива с использованием в составе полимерных отходов на гидравлическом прессе с применением закрытой матрицы.

Однако при такой малой высоте резко снижается производительность брикетирования. При высоте брикетов больше 40 мм прочность их уменьшается незначительно. Наиболее приемлемой высотой с учетом производительности штемпельных прессов при достаточно полном использовании их мощности можно считать  $H = 40$ –100 мм.

Таким образом, анализ показывает, что существует широкий спектр возможностей получения топлива с использованием коммунальных отходов. Их применение в технологиях брикетирования многокомпонентных составов позволяет обеспечивать сокращение объемов захоронения отходов, повышать уровень использования горючих отходов вторичных ресурсов, а также реализовывать программы импортозамещения экспортируемых энергоносителей.

### Литература

1. Хрусталеv, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения [Текст] / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 147–158.
2. Хрусталеv, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов [Текст] / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергоэффективность : ежемесячный науч.-практ. журнал. – 2016. – № 4. – С. 18–22.

УДК 662.8.055.2; 621.43.03

### Подготовка отходов с применением электрогидравлической установки

Хрусталёв Б. М.<sup>1</sup>, Пехота А. Н.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Республика Беларусь

*Представлены материалы исследования, выполнен анализ возможности применения электрогидравлической обработки различных отходов. представлено устройство установки, обеспечивающей электрогидравлическую обработку вторичных материалов. Исследованы характеристики их применения в качестве связующего при многокомпонентном брикетировании твердого топлива.*

В последнее время много говорится о необходимости инновационных прорывов и развитии новых технологий. Ведущие развитые страны мира именно сейчас, во времена различных кризисов, резко увеличивают расходы на науку. Это делается потому, что без фундаментальной науки не будет никаких новых технологий и прорывов. Важнейшая функция науки в том и состоит, что она закладывает основы технологий будущего.

Основной целью данной статьи авторы ставят необходимость более

наглядно представить новые инновационные продукты и технологии, которые в недалеком будущем могут быть внедрены в различных промышленных технологиях переработки отходов. В основе предлагаемых новейших продуктов и технологий лежат ряд ранее проведенных исследований, но в силу различных, в первую очередь технических для того времени обстоятельств, данные технологии были экономически не востребованы и не вызвали глубокого исследовательского внимания.

Проводя ряд исследований в рамках создания технологии производства многокомпонентного твердого топлива (МТТ- *MSF* – multi component solid fuel) [1] появилась необходимость в снижении содержания серы в составе применяемых нефтесодержащих шламов. Поиск путей решения этой проблемы позволил выявить и опробовать ряд технологий, одна из которых не только обеспечила решение требуемой задачи, но и обозначило широкие горизонты её применения с многофункциональностью назначения. Эта технология и непосредственно физическое явление насчитывает известность уже более 60 лет и названо это явление в честь автора его открытия электрогидравлический эффект Юткина [2]. Невысокий уровень практического применения в прошлом был обусловлен опасностью поражения электротокком высокой мощности и невысокой надёжностью, и продолжительностью эксплуатации в основном генераторов импульсного напряжения, однако современный уровень развития технологий позволил эти недостатки устранить и повысить тем самым надёжность и экономическую целесообразность этих устройств.

Особенность этой технологии является прямое преобразование электрической энергии, в механическую энергию минуя передаточные механизмы, что является ключевым свойством электрогидравлического удара.

Несмотря на то, что этот физический эффект был открыт достаточно давно и уже давно используется в промышленности, причем в основном зарубежном, такой эффект известен далеко не всем и в основном узкому кругу специалистов [3-4].

Гидравлический удар вызывается за счет изменения действия давления внутри жидкости в ограниченном объеме и в локальной зоне, во время адиабатического сжатия образующего ударную волну расширения (кавитационного пузыря) и после перехода в ударную волну сжатия вызываемого импульсами электрического разряда. При этом длительность импульса электрогидравлического удара весьма мала и составляет тысячные доли секунды.

Как показывает практика, электрический разряд длится в течение всего от 1 мкс до 10 миллисекунд. За время действия импульса выделяется огромная мощность, причем, чем короче импульс, тем значительней выделяемая мощность. Однако несмотря на то, что используемый эффект давно



применяется практически, сложность расчетов разрядных характеристик рабочих механизмов, формы и размеры электрических разрядников весьма высока и до сих пор остается еще недостаточно изученной проблемой.

По этой тематике написан целый ряд статей, несколько монографий, получен ряд патентов [5-6] для более широкого практического использования электрогидравлического эффекта в промышленности. Авторы обладают обширным материалом применения этого эффекта при подготовке к применению различных отходов и материалов, обеззараживанию, причем эксперименты проводились как с целью уточнения параметров и режимов эффективной работы электроразрядной установки, так и разработки приемлемой системы управления электрическими разрядами в жидкости. Эксперименты проводились как непосредственно в жидкости (воде, других жидкостях), в специальных емкостях (реакторах) выполненных из различных материалов (пластмассовых и стальных камерах, стальных трубках и др.), так и над поверхностью жидкости. Как показали эксперименты, электрогидравлический удар, возникает при электрическом разряде в жидкости уже при напряжении источника порядка 3-5 киловольт и выше.

Схема установки представлена на рис. 1.

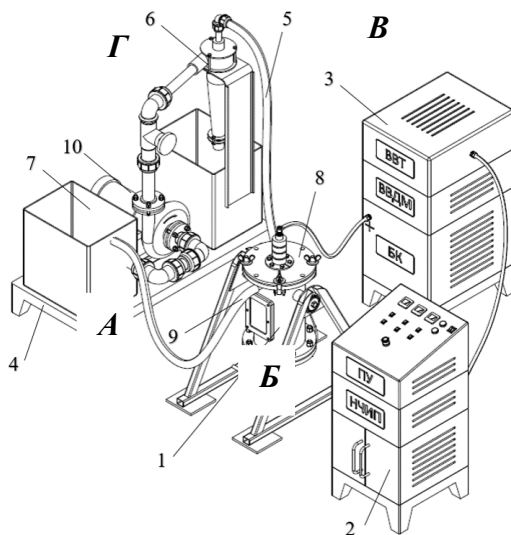


Рис. 1. Схема установки электрогидравлической обработки отходов

Электрогидравлическая установка состоит из 4-х блоков: **А**. Активатора на раме в подшипниках; **Б**. Блока пульта управления (ПУ) с низковольтной частью источника питания (НЧИП); **В**. Блока высоковольтного

трансформатора (ВВТ), высоковольтного диодного моста (ВДМ) и батареи накопительных конденсаторов (БК); Г. Блока гидросистемы с двумя резервуарами, насосом и гидроциклоном.

Установка является закрытого типа, периодического действия с замкнутым контуром движения рабочей жидкости с обрабатываемым материалом (нефтепродукты, отходы, или очистных сооружений и т.п.) с подачей в нижнюю часть разрядного элемента активатора (5). Очистка рабочей жидкости обеспечивается гидроциклоном (6) и отстойником в приемном резервуаре (7).

Загрузка обрабатываемого материала производится сверху, через снятую крышку (8). Выгрузка обработанного материала производится через патрубок в нижней части активатора в сменный накопитель. При необходимости удаление отмытого материала может производиться и через верхнюю крышку активатора. С этой целью активатор подвешен в стойках на подшипниках и имеет возможность отклоняться от вертикального положения. Выход суспензии осуществляется через патрубок в верхней части активатора (9). Циркуляция жидкости и подмешивание при необходимости каталитических элементов определяется производительностью циркуляционного насоса (10).

Сущность работы этого устройства состоит в том, что во влажной среде, например, нефтепродуктов возникает высокое давление в результате специально сформированного импульсного (искрового, кистевого) высоковольтного электрического разряда между электродами, через которые происходят разряды. В соответствии с ранее проведенными исследованиями давление этих разрядов достигает  $300 \text{ Мн/м}^2$  в рабочей среде (обычно в обводненной смеси или высоковолажной среде) [2]. Схематичное представление работы оборудования устройства электрогидравлической обработки нефтепродуктов представлено на рис. 2.

Это давление используется для механического воздействия на материал при их подготовке, что позволяет, задавая определенные параметры разрядов, производить обработку, очистку, эмульгацию, деэмульгацию, разделение и др. Энергия, необходимая для электрического разряда, накапливается в конденсаторах установки емкостью от 10 до 1500 мкф.

В применяемой установке амплитуда ударной волны на расстоянии 10 мм от рабочего органа достигает 50–190 МПа с длительностью разряда не более 200 мкс. Эксперименты на различных поступающих на переработку нефтепродуктах (нефть, нефтешламы, нефтепродукты шлам очистных сооружений и т.п.) показали, что при электрогидравлической обработке интенсивно отделяются разного рода примеси, и прежде всего, сера. Сернистые соединения удаляются из обрабатываемого отхода (в зависимости от типа и вида поступающих отходов) в виде летучих соединений – сероводорода.

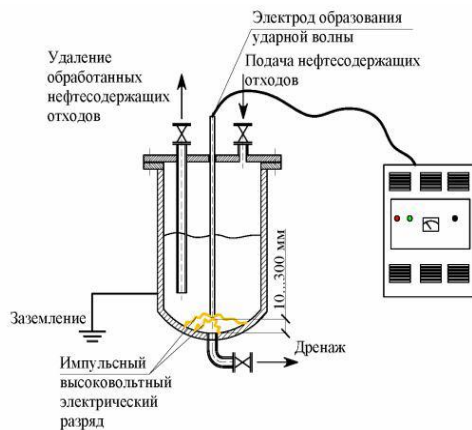


Рис. 2. Схема устройства реактора при электрогидравлической обработке нефтесодержащих отходов

Внешний вид устройства, преобразующего энергию в импульсы тока микросекундной длительности для электрогидравлической обработки нефтесодержащих отходов, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид устройства, преобразующего энергию в импульсы тока микросекундной длительности для электрогидравлической обработки отходов

Таким образом, применение электрогидравлического эффекта является одним из источников создания и реализации множества прогрессивных технологических процессов, которые уже сейчас широко применяются во многих промышленных отраслях всего мира связанных с переработкой отходов.

Одним из главных преимуществ данного метода является его исключительная экологичность, так как способ воздействия электрогидравлического эффекта не принесет никаких дополнительных источников загрязнения окружающей среды в планируемые технологии.

Среди разнообразия известных областей применения электрогидравлического эффекта наиболее актуальными, на взгляд авторов настоящей работы, являются методы использования данного эффекта в стремительно развивающихся индустрии переработки отходов как промышленного происхождения, так и твердых коммунально-бытовых отходов. Однако, на сегодняшний день большинство известных разработок использующих в своих технологиях электрогидравлический эффект находятся на уровне конструкторско-исследовательских аппаратов, поскольку не во всех случаях достигнутая производительность от 0,5 до 5 м<sup>3</sup> (или тонн) в час устраивает промышленного потребителя, а возможность увеличения производительности в большинстве случаев вызывает существенное увеличение энергопотребления.

### Литература

1. Хрусталеv, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 147–158.
2. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. // Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
3. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, в 2-х т. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Торшин, В. В. Логические методы в электродинамике / В. В. Торшин, Б. П. Бусыгин, Ф. Ф. Пашенко // М.: ЦП ВАСИЗДАСТ, 2007. – С. 352.
5. Высоковольтный разрядник (варианты): пат. РФ № 2296404, Б.И.№ 9 / Ф. Ф. Пашенко, В. В. Торшин, Б. П. Бусыгин, Л. Е. Круковский. – Оpubл. 27.03.07.
6. Способ генерирования пара и импульсный парогенератор для осуществления этого способа: пат. РФ № 2293913, Б.И. №5 / Ф. Ф. Пашенко, В. В. Торшин, Л. Е. Круковский. – Оpubл. 20.02.07.

УДК 696.2+697.95

## **Натурные исследования эффективности работы систем вентиляции жилых зданий с газоиспользующим оборудованием**

Борухова Л. В.<sup>1</sup>, Лешкевич В. В.<sup>1</sup>, Мороз Д. Р.<sup>2</sup>, Черванёва Е. А.<sup>1</sup>,  
Черота Ю. В.<sup>2</sup>, Шарапова Н. В.<sup>2</sup>, Шибeko А. С.<sup>1</sup>, Шолоник В. Е.<sup>3</sup>,  
Якимович Д. Д.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ГП «НИИ «Белгипротопгаз»,

<sup>3</sup>УП «Мингаз»

Минск, Республика Беларусь

*Представлены результаты натурных исследований систем естественной вытяжной вентиляции и воздухообмена жилых квартир, оборудованных проточными газовыми водонагревателями и газовыми плитами.*

Тема научно-обоснованных норм и организации воздухообмена в помещения жилых зданий с газоиспользующим оборудованием является актуальной для Беларуси. В Республике Беларусь эксплуатируется значительное количество жилых зданий с бытовым оборудованием, работающим на природном газе (плиты, варочные панели, проточные водонагреватели и др.).

По данным УП «Мингаз» в Минске и Минской области газифицировано 55821 многоквартирный жилой дом. В г. Минске и Минском районе 763 многоквартирных жилых дома, в которых расположено 13428 квартир с 12773 проточными газовыми водонагревателями. В Минске 51 многоквартирный дом с 1358 квартирами и в Минском районе 83 многоквартирных дома с 4593 квартирами с водонагревателями, имеющими закрытые камеры сгорания. Всего в Минске и Минском районе – 134 дома и 5951 квартира.

Анализ происшествий за 2013–2018 гг., связанных с отравлением угарным газом в быту (в том числе и со смертельным исходом), показывает, что одной из причин отравления СО жильцов квартир, где установлено газоиспользующее оборудование, является нарушение естественного воздухообмена.

Установка герметичных заполнений световых проёмов с высоким сопротивлением воздухопроницанию, кухонных вытяжек с принудительным отводом воздуха в общий вентиляционный канал уменьшают воздухообмен помещений, где эксплуатируется газоиспользующее оборудование, могут привести к «опрокидыванию тяги» и появлению угарного газа в воздухе помещения.

В отопительном сезоне 2019–2020 гг. авторами выполнено обследование систем вытяжной вентиляции 24 квартир жилых домов различных проектов,

в которых установлены индивидуальные проточные газовые водонагреватели с открытой камерой сгорания, использующиеся для горячего водоснабжения.

Вытяжные системы вентиляции в обследованных квартирах выполнены в виде каналов во внутренних стенах с установкой в вытяжных отверстиях кухонь и санузлов вентиляционных решеток различной конструкции. Приток наружного воздуха в части квартир является неорганизованным – через неплотности ограждающих конструкций и при открывании форточек, окон, дверей. В ряде обследованных жилых домов (ул. Волоха, д. 7, корпуса 1–3) выполнен капитальный ремонт, в процессе которого в конструкции наружных стен кухонь квартир установлены приточные клапаны с возможностью регулирования размера щели.

Измерение расхода воздуха в системах вентиляции с естественным побуждением движения воздуха выполняют методом косвенных измерений. Измерение температуры, относительной влажности и скорости воздуха в помещении выполняют методом прямых измерений.

Определение расходов удаляемого воздуха проводилось на основании экспериментальных замеров скорости и направления движения воздуха в вытяжных решетках квартир при различных режимах работы систем вытяжной вентиляции квартир: при закрытых и открытых окнах и форточках, а также при работающем и неработающем газовом водонагревателе. Расходы удаляемого воздуха через вытяжные решетки квартиры рассчитывались на основании полученной скорости движения удаляемого воздуха с учётом размеров вытяжных решеток и их площади сечения для прохода воздуха.

Измерения скорости движения воздуха выполнялись с помощью крыльчатых анемометров; измерение температуры и относительной влажности наружного и внутреннего воздуха осуществлялось с помощью электронного термогигрометра. При проведении исследований контролировалась концентрация углекислого газа в наружном воздухе и воздухе помещений при различных режимах работы газоиспользующего оборудования.

В процессе исследований установлен ряд конструктивных недостатков и дефектов эксплуатации систем вентиляции, что привело к недостаточному воздухообмену или полному его отсутствию.

Довольно часто встречающейся проблемой является присоединение к вытяжному отверстию кухонь воздуховодов от кухонных вытяжек. Это приводит к перекрытию сечения вытяжного отверстия и невозможности работы естественной вентиляции.

Значительную долю дефектов систем вентиляции обследованных квартир составляют существенное загрязнение вытяжных каналов и решеток, а также применение решеток с малой площадью «живого» сечения для прохода воздуха.

При обследовании квартир с приточными клапанами в наружных стенах установлено, что жильцами, как правило, не производится самостоятельная регулировка размеров приточных щелей: тарелки клапанов находятся в положении, установленном в процессе монтажа. В отдельных квартирах клапаны закрыты полностью, а их тарелка приклеена к корпусу.

Анализ проведенных исследований работы систем вентиляции в газифицированных жилых домах 1950–1960-х годов постройки показывает, в среднем максимальный расход удаляемого воздуха через вентиляционные каналы размером 140×140 мм составляет от 40 до 73 м<sup>3</sup>/ч. Запроектированные в этих зданиях каналы не предназначены для перемещения нормативного расхода удаляемого воздуха 90 м<sup>3</sup>/ч для кухонь с установленными в них газовыми 4-горелочными плитами.

На основании анализа данных проведенных исследований можно сделать заключение, что только в двух квартирах (в которых установлены приточные клапаны с возможностью регулирования размера щели) из 24 обследованных действительный воздухообмен в квартире соответствует нормативному значению. Качество воздуха в большинстве обследуемых квартир во время проведения испытаний можно отнести к классу 3 и 4 согласно ГОСТ 30494, т. е. с допустимым и низким качеством воздуха.

### Литература

1. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. – Взамен ГОСТ 30494–96; введ. 01.01.19. – Минск: Госстандарт, 2018. – 15 с.
2. ТКП 45-3.02-324–2018 (33020). Жилые здания [Текст]. – Взамен ТКП 45-3.02-230–2010 (022540), СНБ 3.02.04–03, П1-99 к СНБ 3.04.02–03; введ. 01.11.18. – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018. – 25 с.
3. ТКП 629–2018 (33040). Техническая эксплуатация дымовых и вентиляционных каналов жилых домов. Организация и порядок проведения [Текст]. – Введ. 01.03.19. – Минск: Минжилкомхоз, 2018. – 29 с.
4. Борухова, Л. В. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий [Текст] / Л. В. Борухова, А. С. Шибeko // Наука и техника. – Т. 17. – 2018. – № 4. – С. 306–313.

**Особенности измерения энергетических показателей зданий  
на начальной стадии эксплуатации**

Данилевский Л. Н.  
ГП «Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С. С.»  
Минск, Республика Беларусь

*На основании проведенных измерений показано, что энергетические характеристики многоквартирных зданий на начальной стадии эксплуатации имеют ряд особенностей, затрудняющих их измерение: температура воздуха в квартирах, поддерживается на оптимальном и выше оптимального уровне, бытовые тепловыделения во многих квартирах отсутствуют, что увеличивает потребность здания в тепловой энергии на отопление, воздухообмен составляет около 50 % от расчетной величины, что уравнивает потребление энергии стандартных зданий и аналогичных, в которых используют системы вентиляции с механическим приводом и рекуперацией тепловой энергии вытяжного воздуха.*

Наиболее объективным показателем для характеристики энергоэффективности здания является удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Этот показатель принят в качестве основного во многих европейских странах [1], также в Республике Беларусь и странах СНГ [2]. Для сравнения с проектными и нормативными требованиями показатель удельного потребления тепловой энергии на отопление необходимо привести к расчетным условиям эксплуатации здания. Эта задача была поставлена и решена в [3].

В то же время, остается открытым вопрос о возможности определения показателя удельного потребления тепловой энергии для отопления и вентиляции на начальной стадии эксплуатации жилых зданий.

В практике строительства Республики Беларусь допускается сдача зданий в эксплуатацию без окончательной отделки квартир. Постепенность заселения многоквартирных жилых зданий приводит к некоторым особенностям в формировании теплового баланса, которые принимаются как должное. В первую очередь, мощность бытовых тепловыделений в здании, связанных с проживанием людей, оказывается ниже уровня, характерного для полностью заселенных зданий. Температура воздуха в квартирах может отличаться от допустимых или оптимальных значений.

В научной периодике отсутствуют систематизированные данные по поставленным проблемам.



### Температура воздуха и бытовые тепловыделения в квартирах многоквартирного здания на стадии заселения.

Основой для анализа послужили результаты исследования теплотехнических показателей жилых зданий на начальной стадии эксплуатации. Выполнялись исследования температурных режимов в квартирах и потребления тепловой энергии по показаниям квартирных теплосчетчиков, а также общего счетчика энергии на отопление здания с учетом изменения температуры наружного воздуха. В качестве дополнительного показателя анализировалось потребление горячей воды в здании.

В соответствии с нормативными требованиями в каждой квартире предусмотрена возможность автоматического регулирования температуры в жилых помещениях. На рисунке представлена гистограмма среднемесячных (февраль 2018 года) значений температуры воздуха в квартирах здания. Измеренные значения температуры находятся в широком диапазоне значений от 18 до 27 °С, так что можно прогнозировать теплообмен между квартирами вследствие разности температур воздуха в квартирах.

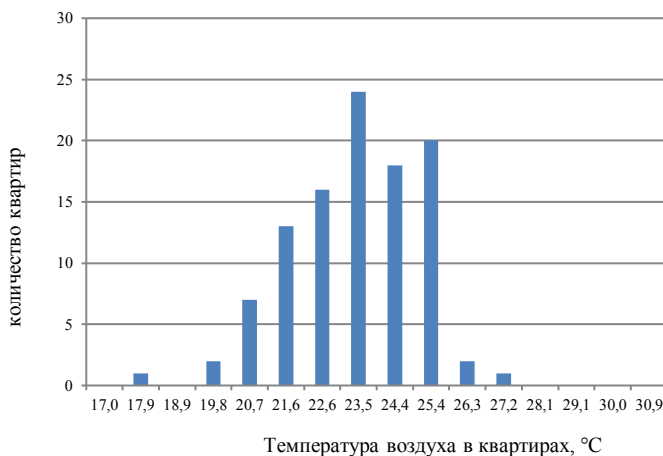


Рис. Статистическое распределение температуры воздуха, °С

На момент выполнения измерений заселенность квартир составляла около 30 %, т. е., было заселено около 40 квартир. Среднее значение температуры по приведенным данным составляет 23,6 °С, что на 30 % превышает допустимое значение температуры воздуха, 18 °С, для которой выполняются расчеты удельного потребления энергии на отопление. Поэтому

тепловые потери из здания увеличены также на 30 % по сравнению с проектным значением, около 15 кВтч/(м<sup>2</sup>·год).

Оценка количества жителей, М, проводилась по косвенному показателю, объему потребления горячей воды. Исследование удельного потребления горячей воды на одного человека, результаты которого приведены в [3] дали жителей в квартирах многоэтажных зданий. За основу было принято значение 70 л/(чел·сутки) при определении значения М.

Расчет количества жителей выполнялся из предположения расхода горячей воды 70 л/(чел·сутки) [3] и показал изменение от 130 (10.2017 г) до 220 (04.2018 г). Мощность и энергия бытовых тепловыделений приняты равными, с учетом результатов исследований, приведенных в [3], 147 Вт/чел при среднеквадратичном отклонении 7 Вт/чел.

Энергия тепловыделений в здании уменьшена на 18 кВтч/м<sup>2</sup> за отопительный сезон. Повышенная температура воздуха и пониженный уровень бытовых тепловыделений повышают потребление тепловой энергии на отопление с расчетноого значения 15 кВтч/(м<sup>2</sup>год) [3] до 48 кВтч/(м<sup>2</sup>год).

#### **Удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию**

На стадии заселения измерение теплоэнергетических показателей зданий становится проблематичным по многим причинам. Стоит вопрос о длительности переходного периода эксплуатации.

Приведенные выше обстоятельства требуют особого подхода к измерению теплотехнических показателей зданий.

Анализ потребления тепловой энергии на отопление в отопительном сезоне 2017-2018 гг. среднемесячных значений температуры наружного воздуха в г. Гродно показал удельное потребление энергии в отопительном сезоне 2017 -2018 гг. 50,18 кВтч/м<sup>2</sup>, что близко к 48 кВтч/м<sup>2</sup>.

С учетом имеющейся информации о потреблении горячей воды и температуре воздуха можно выполнить расчет удельных показателей зданий для расчетных условий. Следует отметить, что в незаселенных и слабозаселенных зданиях при одинаковых значениях приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций удельные показатели зданий могут отличаться незначительно или вовсе не отличаться

Данное предположение подтверждается наблюдением за эксплуатацией четырех зданий серии 111-90 МАПИД. Это 19-ти этажные здания с отапливаемой площадью 9200 м<sup>2</sup> с одним подъездом. В здании номер один используется принудительная приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией тепловой энергии вентиляции выбросов. В остальных зданиях – система вентиляции с естественным побуждением.

В табл. 1 приведены значения удельного потребления тепловой энергии на отопление в отопительных сезонах 2017-18 и 2018-19 годов.

В то же время, из результатов, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что удельное потребление тепловой энергии на отопление зданий практически одинаково, отличия составляют не более чем на  $\pm 5\%$ . Из этого следует что потери с воздухообменом в зданиях также находятся на одном уровне и равны около  $20 \text{ кВтч/м}^2$  за отопительный сезон. Следовательно, если объем воздухообмена в здании № 1 соответствует расчетному значению, уровень воздухообмена в остальных зданиях составляет менее  $50\%$  расчетной величины.

Таблица 1

Удельное потребление энергии на отопление в отопительных сезонах 2017-2018 и 2018-2019 годов.

Отопительный сезон, год	Удельное потребление за отопительный сезон, $\text{кВтч/м}^2$					
	Пта-шука 1	Пта-шука 3	Пта-шука 5	Пта-шука 7	Пта-шука 9	Сред
<b>2017 - 18</b>	47,6	50,7	46,3	52,1	47,5	48,8
<b>2018 - 19</b>	53,1	49,5	45,2	51,6	48,3	49,5

Многоквартирные здания не могут рассматриваться как простое объединение многоквартирных. Энергетические характеристики многоквартирных зданий на начальной стадии эксплуатации имеют ряд особенностей:

1. Температура воздуха в квартирах, поддерживается на оптимальном и выше оптимального уровне.
2. Бытовые тепловыделения во многих квартирах отсутствуют, что увеличивает потребность здания в тепловой энергии на отопление.
3. Воздухообмен составляет около  $50\%$  от расчетной величины, что уравнивает потребление энергии стандартных зданий и аналогичных, в которых используют системы вентиляции с механическим приводом и рекуперации тепловой энергии вытяжного воздуха.

### Литература

1. Implementing the energy performance of buildings directive (EPBD) / Featuring country reports 2012. - Co-funded by European Region. ADENE, 2013. – 368 p.
2. Тепловая защита зданий. Теплоэнергетические характеристики. Правила определения: ТКП 45-2.04-196-2010. // Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации, 2010.
3. Данилевский, Л. Н. Энергоэффективные жилые здания: тепловая защита; утилизация тепловых выбросов; измерение теплоэнергетических показателей / Л. Н. Данилевский // LAMBERT Academic Publishing 2018. – 540 с.

**Расчет потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений с учетом теплотехнических неоднородностей при проектировании систем отопления**

Пивень О. В., Данилевский Л. Н., Терехова И. А., Терехов С. В.  
ГП «Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С. С.»  
Минск, Республика Беларусь

*Выполнен сравнительный анализ методов расчета потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений.*

При расчете мощности системы отопления в сумме с потерями теплоты за счет вентиляции и инфильтрации, бытовыми тепловыделениями, учитывают потери теплоты через ограждающие конструкции помещений.

При определении способа расчета потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений ключевым фактором является выбор методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций  $R_{пр}$ . В соответствии с [1] расчет значения приведенного сопротивления теплопередаче возможен упрощенным методом, как суммы термических сопротивлений слоев конструкции и сопротивлений теплоотдаче и тепловосприятию поверхностей, а также детальным, основанным на расчете температурных полей участков ограждающих конструкций. В тоже время в [2] изложен метод расчета  $R_{пр}$  с применением значений удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности (далее – ТН), определяемых по таблицам Каталога [3] или расчётом с использованием температурных полей узлов ограждающих конструкций. Ввиду отсутствия четких указаний в [1] относительно методов расчета величины  $R_{пр}$ , зачастую на практике специалисты по проектированию раздела «Отопление и вентиляция» используют упрощенный метод. Между тем современные ограждающие конструкции обладают пониженной теплотехнической однородностью из-за наличия конструктивных и геометрических (углы, проемы, выступы) ТН. Теплотехнические неоднородности приводят к существенному искажению температурного поля относительно плоских участков, повышая потери теплоты через ограждения. В соответствии с [2] ТН классифицируются на линейные, объемные и точечные, а обусловленные ими дополнительные потери теплоты выражаются как удельные значения на единицу длины либо количеством ТН соответственно.

Использование более точных методов расчета  $R_{пр}$ , учет ТН позволит более корректно рассчитывать потери теплоты помещениями и повысит качество проектирования систем отопления.

В соответствии с [4], при расчете приведенного сопротивления теплопередаче упрощенным методом, определение потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений возможно по формуле (1):

$$Q_{\text{п}} = A_i \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot \left(1 + \sum \beta\right) \cdot \frac{n}{R_{\text{т}}}, \quad (1)$$

где  $A$  – расчетная площадь ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{в}}$  – расчетная температура внутреннего воздуха, °С;  $t_{\text{н}}$  – расчетная температура наружного воздуха, °С, принимаемая в соответствии с [4];  $\beta$  – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь, определяемые в соответствии с приложением Ж [4];  $n$  – коэффициент, принимаемый по [1] в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху;  $R_{\text{т}}$  – приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·°С/Вт, определяемое по [1].

Для повышения точности расчета потерь теплоты через наружные ограждающие конструкции помещений рекомендуется использовать значения удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности и выполнять расчет по формуле (2):

$$Q_{\text{п}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot \left( \sum \frac{A_i}{R_{0i}} + \sum \Psi_i \cdot L_i + \sum \chi_k \cdot N_k + \sum \chi_m \cdot N_m \right), \quad (2)$$

где  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{н}}$  – то же, что в формуле (1);  $A_i$  – площадь теплотехнически однородной  $i$ -й части ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $R_{0i}$  – сопротивление теплопередаче теплотехнически однородной части ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·°С/Вт, определяемое как сумма термических сопротивлений слоев конструкции и сопротивлений теплоотдаче и тепловосприятию поверхностей;  $\Psi_j$ ,  $\chi_k$ ,  $\chi_m$  – удельные потери теплоты через линейные, точечные и объемные ТН соответственно, Вт/(м·°С), Вт/(шт.·°С), Вт/(шт.·°С), определяемые по [2], [3];  $L_i$  – длина линейных теплотехнических неоднородностей ограждающих конструкций помещения, м;  $N_k$ ,  $N_m$  – количество объемных и точечных теплотехнических неоднородностей в ограждающих конструкциях помещения, шт.

Для сравнения методов расчета рассмотрен пример определения потерь теплоты через наружные стены помещения, расположенного на типовом этаже четырехэтажного жилого здания в г. Минске. Расчетная температура наружного воздуха составляет минус 24 °С.

Наружные ограждающие конструкции ориентированы на север и северо-запад. Высота этажа 3 м. Конструкция наружных стен – кладка из полнотелого силикатного кирпича толщиной 250 мм с наружным утеплением минераловатными плитами плотностью 135 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 150 мм в составе легкой штукатурной системы утепления. Крепление теплоизоляционного слоя выполнено анкерными устройствами со стальным распорным элементом диаметром 5 мм с термозаглушкой, количество анкерных устройств

5 шт./м<sup>2</sup>. Монолитные плиты перекрытия перфорированы в зоне балконов с шагом 1:1. Геометрические показатели показаны на рисунке.

Результаты расчета сопротивления теплопередаче теплотехнически однородной части наружных стен представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сопротивления теплопередаче теплотехнически однородной части наружных стен

Наименование материала	Толщина, м	Расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Термическое сопротивление теплопередаче слоя, м <sup>2</sup> ·°С/Вт
Кладка из полнотелого силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе	0,25	0,039	0,216
Плиты минераловатные, плотностью 135 кг/м <sup>3</sup>	0,15	0,0436	3,440
Армированный и декоративно-защитный слой	0,007	0,93	0,008
Итого:			3,66
Сопротивление теплопередаче с учетом сопротивления тепловосприятию и теплоотдаче:			<b>3,82</b>
Приведенное сопротивление теплопередаче с учетом влияния анкерных устройств (коэффициент теплотехнической однородности принят по табл. 2 ТКП 45-3.02-113-2009)			<b>3,49</b>



Рис. Геометрические показатели наружных стен помещения

Результаты расчета потерь теплоты через наружные стены (НС) помещения по формулам (1) и (2) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета потерь теплоты через наружные стены помещения

Часть ограждающей конструкции, описание ТН	Значение удельных потерь теплоты через ТН	Геометрический параметр	Потери теплоты через часть ограждающей конструкции, ТН, Вт
Плоскость НС	0,262	$A_1 = 12,6 \text{ м}^2$	138,53
Выпуклый угол НС	-0,083	$L_1 = 3,0 \text{ м}$	-10,08
Вогнутый угол НС	0,0135	$L_2 = 3,0 \text{ м}$	1,70
Вертикальные и нижние откосы проемов	0,042	$L_3 = 5,71 \text{ м}$	10,07
Верхний горизонтальный откос проема (ж/б перемычка)	0,045	$L_4 = 1,51 \text{ м}$	2,85
Примыкание НС к междуэтажному перекрытию	0,0016	$L_5 = 1,2 \text{ м}$	0,08
Примыкание НС к балконному перекрытию	0,53	$L_6 = 3,5 \text{ м}$	77,91
Анкерные устройства	0,0037	$n_1=63 \text{ шт.}$	9,79
<b>Итого с учетом ТН, Вт</b>	–	–	<b>272,86</b>
<b>По формуле (1):</b>			<b>174,38</b>

В результате сравнения методов расчета потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений получено, что разница между значениями, полученными по формуле (2) (расчет по [4]), по сравнению со значениями, полученными по формуле (1) (расчет по [1]), составляет 98,5 Вт, что сопоставимо с мощностью потребляемой одной секцией отопительного прибора. Следовательно, упрощенный расчет тепловой нагрузки может привести в данном случае к невозможности поддержания комфортной температуры в помещении. Реальность таких ошибок подтверждает необходимость использования точных расчетов.

### Литература

1. ТКП 45-2.04-43-2006 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования.
2. Р 1.04-180-2019 Рекомендации по применению удельных потерь теплоты (тепловых мостиков) при проектировании ограждающих конструкций зданий
3. Каталог удельных потерь теплоты (тепловых мостиков) теплотехнически неоднородных узлов ограждающих конструкций жилых и общественных зданий, утв. Государственным предприятием «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.» 30.10.2019 г.
4. СНБ 4.02.01-03 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.

## Интеграция гелиоустановки в систему централизованного теплоснабжения

Рутковский М. А., Станецкая Ю. А., Павловская А. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Закон Республики Беларусь от 08.01.2015 N239-3 «Об энергосбережении» основывается на принципах приоритетности внедрения энергоэффективного оборудования, технологий и материалов при эффективном и рациональном использования топливно-энергетических ресурсов, что увеличит энергетическую безопасность и независимость Республики Беларусь. Целью данной работы является показать особенности интеграции гелиосистемы с сезонным аккумулированием в систему централизованного теплоснабжения для экономии ресурсов в условиях Беларуси.*

В соответствии с государственной политикой использование возобновляемых источников энергии должно применяться в энергосистеме. Одним из направлений является использование солнечной энергии. На данный момент недостаточно внимания уделяется централизованным установкам с сезонным аккумулированием теплоты. Существует ряд примеров таких установок, состоящих из следующих основных элементов [1]: гелиоколлекторы, аккумуляторы теплоты, тепловые насосы, вспомогательные источники теплоты, сеть трубопроводов, потребители. Основная идея такой системы состоит в компенсации недостатка солнечной энергии в зимнее время. На рис. 1 показана схема системы с основными потоками энергии, которые следует закладывать в расчет при моделировании (на схеме буквами  $E$  обозначены необходимые потоки дополнительной электрической энергии для работы оборудования, буквами  $Q$  потоки получаемой теплоты и тепловые потери).

Простейшим и наиболее понятным методом расчета экономического потенциала использования солнечных систем с сезонным накоплением тепла является сравнение количества теплоты, получаемого от гелиоколлекторов, с нуждами потребителей. Для этого необходимо определить количество полезной солнечной энергии, получаемой потребителем, которое можно рассчитать по КПД основного элемента системы – гелиоколлектора. Тепловая эффективность солнечного коллектора зависит от типа солнечного коллектора, его схемы и геометрических размеров, параметров теплоносителя в гелиоконтуре, климата зоны эксплуатации.



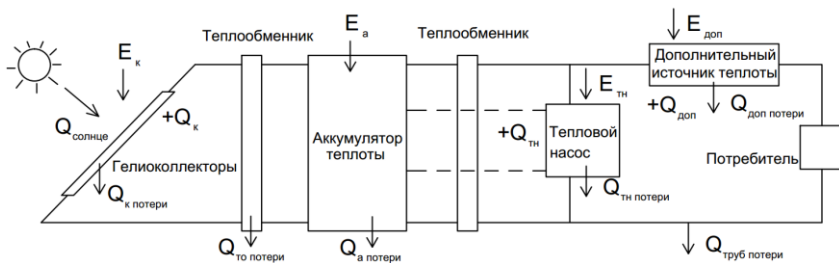


Рис. 1. Принципиальная схема учета тепловых потоков центральной гелиосистемы

Тепловоспринимающие элементы (гелиоколлекторы) должны иметь соответствующий наклон и быть ориентированы определенным образом для получения максимального (или близкого к максимальному) количества солнечной энергии. На основе анализа радиационного климата в Беларуси [2, 3] была построена диаграмма, показывающая, во сколько раз уменьшается сезонное поступление полной солнечной энергии на поверхность (или гелиоколлектор) в зависимости от угла ее наклона для разных азимутов относительно южного направления для весенне-летне-осеннего периода Беларуси (рис. 2) [2].

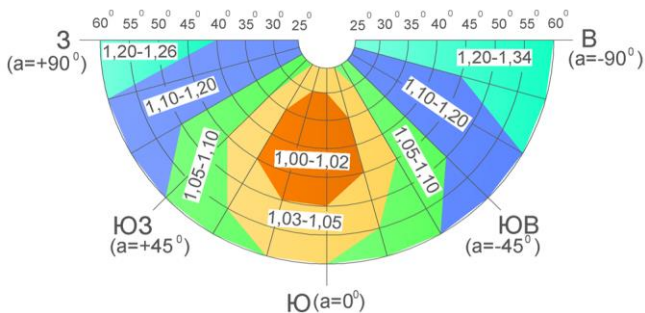


Рис. 2. Диаграмма определения коэффициента уменьшения солнечной энергии для различных азимутов

Плоские гелиоколлекторы с одинарным остеклением и трубчатые вакуумные являются наиболее распространенными в настоящее время [4]. Также используются плоские коллекторы с повышенной изоляцией – вакуумированные с двойным полупрозрачным покрытием.

Плоский коллектор состоит из последовательных плоских слоев «солнечного» стекла, теплового элемента для поглощения солнечной энергии и слоя теплоизоляции, размещенных в достаточно герметичном корпусе. Основным элементом трубчатых вакуумных коллекторов является «трубка» (рис. 3), которая состоит из стеклянной колбы 1 с двойным остеклением и вакуумированным зазором и термoeлементом 2.

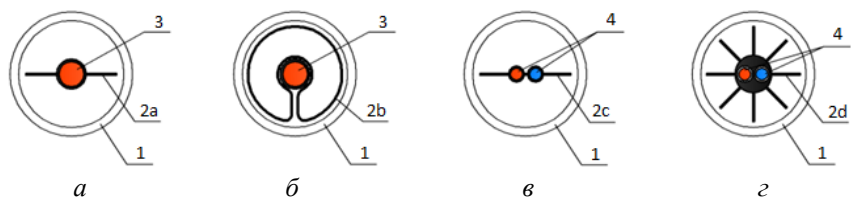


Рис. 3. Поперечное сечение трубки различных типов вакуумированных трубчатых гелиоколлекторов:

*а, в* – коллектор с плоским тепловым элементом (2а, 2с), *б* – с цилиндрическим элементом (2б), *г* – с термостойким элементом из алюминиевого сплава (2д), 1 – колба, 3 – тепловая трубка, 4 – U-образная медная трубка циркулирующей охлаждающей жидкости

Плоский тепловой элемент 2а предназначен для коллекторов, где колба должна поворачиваться во время установки на любой оптимальный угол за Солнцем, что фактически не приносит практического эффекта. Идея теплового цилиндрического элемента 2б позволяет воспринимать излучение под любым углом падения солнечной энергии, но эффективность теплопередачи за счет теплопроводности пластины поз.2б по «длинному» пути сомнительна. Применение тепловых труб 3 не дает теплового преимущества в эффективности передачи тепла по сравнению с традиционным методом прямой циркуляции теплоносителя (рис. 3, в, г), которые обладают более высокими тепловыми качествами благодаря прямому контакту теплоносителя с теплоносителем. Но они имеют более высокую стоимость.

Также необходимо учитывать некоторые особенности работы вакуумных трубчатых коллекторов. Фактическая чувствительная к температуре поверхность трубчатого коллектора намного меньше его геометрической поверхности (рис. 4). Для получения идентичной чувствительной к теплу поверхности геометрическая поверхность трубчатых коллекторов должна быть в 1,44 раза больше.

Срок службы трубчатого коллектора составляет 10-12 лет. Гарантийный срок от 1 до 5 лет. Некоторые полномасштабные эксплуатационные исследования не показали столь явного преимущества трубчатых коллекторов

над обычными плоскими системами в условиях средневропейского климата. Основной причиной является замерзание, налипание снега к «холодным» трубам коллектора, не допускающее проникновения солнечного излучения.

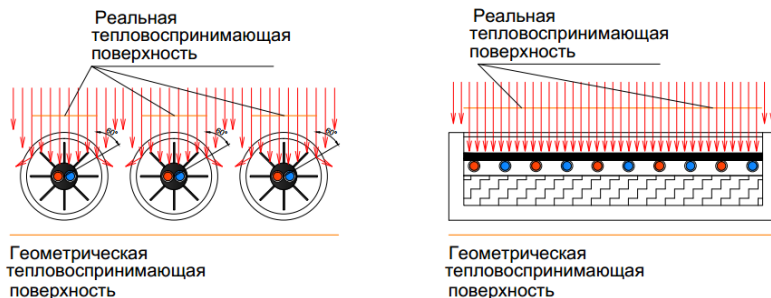


Рис. 4. Оценка реальной теплопоглощающей поверхности трубчатых и плоских гелиоколлекторов

Существенным недостатком коллекторов с теплоизоляционным полупрозрачным покрытием является значительное повышение температуры охлаждающей жидкости при отсутствии циркуляции более 200 °С по сравнению с плоскими, температура которых достигает не более 150 °С. Чтобы избежать кипения охлаждающей жидкости, необходимо поддерживать избыточное давление не менее 3 бар в резервуарах – для плоских коллекторов с одинарным остеклением и более 6 бар – для коллекторов с теплоизоляционным полупрозрачным покрытием. При высоких температурах срок службы жидкости резко уменьшается.

Для условий Беларуси более подходят плоские коллекторы. Срок службы более 30 лет, гарантийный срок от 1 до 13 лет.

### Литература

1. Xu, J., et al., A Review of Available Technologies for Seasonal Thermal Energy Storage, *Solar Energy*, 103 (2014), May, pp. 610-638.
2. Покотилов, В. В. Использование солнечной энергии для повышения энергоэффективности жилых зданий: справочное пособие / В. В. Покотилов, М. А. Рутковский. – Минск, 2015. – 64 с.
3. Рутковский, М. А. Гелиосистемы жилых домов для эксплуатационных условий Республики Беларусь / М. А. Рутковский // *Наука и техника*. – 2017. – № 4 – С. 324–334.
4. Patel, Mukund R. *Wind and solar power systems* / Mukund R. Patel – USA, New York, U.S.: Merchant Marine Academy, Kings Point, 1999, – 348 p.

**Перспективы внедрения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей**

Бодров М. В., Кузин В. Ю., Морозов М. С., Смыков А. А.  
Нижегородский государственный архитектурно-строительный  
университет (ННГАСУ)  
Нижний Новгород, Российская Федерация

*Проведён комплекс исследований, посвящённый определению теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей. Описаны лабораторные эксперименты, реализованные на базе Лаборатории лучистого отопления новейшего Учебно-научно-исследовательского центра «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» ННГАСУ.*

Ввиду ряда факторов, системы лучистого отопления являются одним из наиболее перспективных мероприятий по повышению энергоэффективности крупнообъёмных помещений [1, 2]. Среди прочих способов оно заслуживает особого внимания, т. к. по сравнению с конвективными системами отопления требует меньших затрат теплоты без снижения уровня теплового комфорта. Нормативные документы, определяющие требования к микроклимату крупнообъёмных помещений, не учитывают особенности работы лучистых систем отопления. Эти требования перечёркивают преимущества лучистых систем над конвективными, которые могут позволить снизить потребление теплоты на величину до 40 %. Одним из факторов, который позволяет снизить расход теплоты на отопление является снижение температуры внутреннего воздуха  $t_v$  на величину до 4 °С по сравнению с нормативными значениями, предусмотренными при проектировании конвективных систем отопления. За счёт большой плотности потока инфракрасного излучения в помещениях с лучистыми системой, несмотря на снижение температуры воздуха, результирующая температура помещения остаётся неизменной.

Самым привлекательным, с точки зрения энергоэффективности, является отопление на базе газовых инфракрасных излучателей (ГИИ). В данных системах отсутствует промежуточный теплоноситель, и теплота в помещение подаётся напрямую от первичного энергоносителя – природного газа. Однако, применение лучистых систем отопления на базе ГИИ строго ограничено. Также, стоит учесть, что подключение газа во многих регионах связано со значительными финансовыми затратами.

Ввиду вышеописанных особенностей ГИИ стоит рассмотреть другой энергоэффективный вид лучистого отопления – отопление на базе водяных инфракрасных излучателей (ВИИ). В качестве отопительных приборов в данных системах используются излучающие панели или профили. Стоит также отметить, что наиболее перспективным ВИИ является именно излучающий профиль, ввиду меньшей металлоёмкости и большей удельной теплоотдачи. Теплоносителем в таких системах является горячая вода с температурой 40...150 °С.

Для проведения комплекса исследований системы отопления на базе ВИИ в ННГАСУ совместно с единственной компанией производителем излучающих профилей в России «Флайг+Хоммель» был открыт Учебно-научно-исследовательский центр «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» (УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ), в состав которого вошла Лаборатория лучистого отопления (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид Лаборатории лучистого отопления

Для проведения ряда лабораторных экспериментов была сконструирована экспериментальная установка (рис. 2).

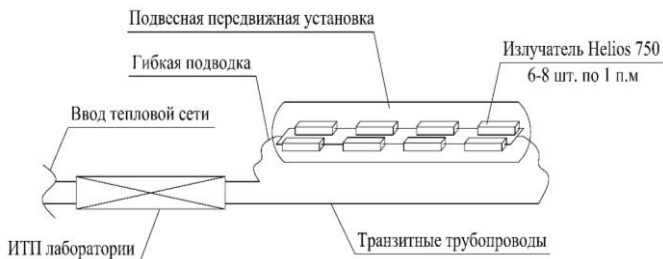


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Основная задача, которая встала перед сотрудниками Лаборатории – создание полноценной теплофизической модели работы системы на базе ВИИ. Для этого необходимо было определить теплотехнические характеристики отопительных приборов, например, удельную теплоотдающую способность 1 п.м прибора. Объектом исследований стал излучающий профиль марки Helios 750 (рис. 3).

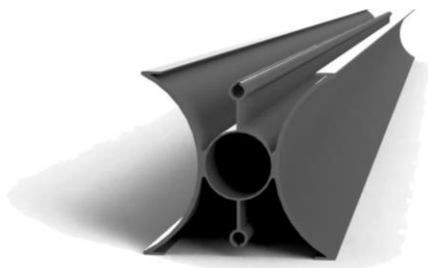


Рис. 3. Инфракрасный излучающий профиль марки Helios 750

Измерение удельной теплоотдачи 1 п.м. излучателя  $q_{\text{изл}}$  производилось с помощью электромагнитного расходомера-счётчика марки ЭРСВ-570Ф и вычислителя количества теплоты ТРСВ-026М производства ЗАО «Взлёт». Для определения удельной мощности ВИИ при любом температурном перепаде  $\Delta T$ , необходимо определить показатели  $a$  и  $m$  для уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m \quad (1)$$

Чтобы определить показатели  $a$  и  $m$  была построена линейная регрессия в логарифмическом масштабе. В результате построения линейной регрессии уравнение (1) для нашего случая будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{изл}}^{H750} = 2,8881 \cdot \Delta T^{1,2423}$$

Следовательно, стало возможным создание таблицы и график для всего диапазона  $\Delta T$ , который может встретиться при применении ВИИ Helios 750 (рис. 4, табл.).

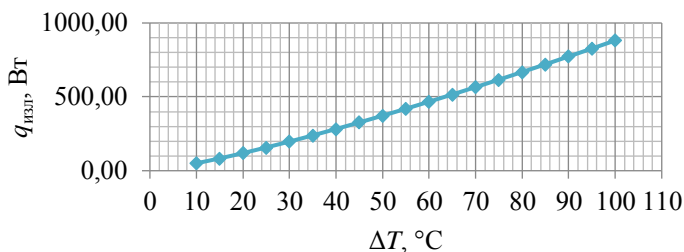


Рис. 4. Результаты исследований удельной тепловой мощности

Таблица

Удельная мощность Helios 750 при фиксированных значениях  $\Delta T$

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$q_{\text{изл}}, \text{Вт/П.М}$	50,46	83,51	119,38	157,52	197,56	239,26	282,43	326,94	372,66	419,50	467,39	516,26	566,04	616,70	668,18	720,45	773,47	827,21	881,64

На базе УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ был проведён комплекс исследований теплотехнических характеристик ВИИ. Результаты данных исследований легли в основу инженерной методики проектирования энергоэффективных систем отопления на базе данных отопительных приборов и будут использованы при разработке тепловой модели помещения с системой отопления на базе ВИИ.

### Литература

1. Бодров, В. И. Исследование систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей / В. И. Бодров, М. В. Бодров, А. А. Смыков // Приволжский научный журнал. – 2019. № 3 (51). – С. 52–57.
2. Бодров, В. И. Исследование теплотехнических характеристик низкотемпературных инфракрасных излучателей / В. И. Бодров, М. В. Бодров, А. А. Смыков // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2019. № 10 (214). – С. 32–36.

**Основные пути решений современных задач энергосбережения  
в отапливаемых зданиях Республики Беларусь**

Фиалко И. Ф.

Филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала БНТУ»  
Минск, Республика Беларусь

*Разработки конструктивных элементов зданий, обеспечивающие оптимизацию энергосбережения отапливаемых объектов, требуют комплексного, на базе оценки соответствия технических решений требованиям энергетической эффективности, согласования технических решений архитекторов, конструкторов и сантехников на всех стадиях проектирования. Новыми строительными нормами и правилами предусмотрены алгоритмы реализации требований для всех этапов проектирования и строительства зданий, предусматривающие обеспечение оптимальных показателей и классов энергетической эффективности с заполнением свидетельства энергетической эффективности и эксплуатационного паспорта объекта.*

Проблема энергосбережения стала остро актуальной в строительстве, а также коммунальной сфере, где энергетические затраты, выраженные в денежной форме, оказались особенно обременительными для бюджета и населения. Как следствие, потребители энергоресурсов должны научиться, а проектировщики предусматривать возможности реализации методов снижения энергопотребления.

Производство строительных материалов, технологические процессы возведения и, особенно, эксплуатации зданий потребляют наибольшее количество энергии, особенно тепловой. В структуре энергопотребления развитых странах Европы максимальная доля ТЭР – 40 % приходится на строительство, а транспорт и промышленность занимают 32 и 28 % соответственно.

За последние годы принято большое количество нормативных правовых актов, напрямую или косвенно связанных с энергосбережением, накоплен определенный опыт, сложилось несколько конкретных направлений формирования энергосберегающей политики государства в целом и отдельных отраслей хозяйства. Для усиления работы по энергоэффективности, выполнения повышенных заданий по энергосбережению возникла необходимость использовать передовой зарубежный опыт эффективного использования ТЭР.



Известно, что во всем мире здания являются крупнейшим потребителем энергии. Количество зданий продолжает расти и по прогнозу Международного энергетического агентства глобальный спрос на их энергоснабжение к 2035 году вырастет еще на 30%. Как следствие, стратегически должно поощряться не только строительство энергоэффективных зданий, но и **существенное снижение энергопотребления эксплуатируемых, особенно малозэтажных, что особенно актуально для Беларуси.**

Действующая европейская Директива об энергетических характеристиках зданий требует планировать возведение в странах ЕС новых зданий с практически нулевым потреблением энергии. При этом оформляются и выдаются свидетельства об энергетической эффективности, которые подтверждают соответствие энергетических характеристик требованиям законодательства и норм.

В Беларуси пока сделаны первые шаги по проектированию зданий с минимальным энергопотреблением на базе общепринятой в ЕС классификации энергоэффективности.

Первым этапом подхода к разделению объектов строительства по энергетической эффективности является классификация жилых зданий по показателям удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, введенная изменением № 3 ТКП 45-2.04-196-2010 «Тепловая защита зданий. Теплоэнергетические характеристики. Правила определения», где приведены классы жилых зданий по показателю удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию в отопительном периоде.

В разработанных впервые строительных нормах Республики Беларусь «Здания и сооружения. Энергетическая эффективность» нормируются базовые значения удельного расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период для жилых и общественных зданий, классифицируется их энергоэффективность от «очень высокий» до «чрезвычайно низкий» в зависимости от диапазона отклонений от нормируемых базовых величин. Эта классификация распространяется также и на показатели удельных расходов энергии на подогрев воды в системе горячего водоснабжения.

Класс проектируемого здания по вышеприведенным нормируемым показателям осуществляется в соответствии с СП «Тепловая защита зданий».

Проектирование новых жилых зданий следует выполнять для объектов энергоэффективностью классов «очень высокий и высокий» (энергоэффективные здания). При проектировании новых общественных и административных, а также модернизируемых и реконструируемых зданий допускается «нормальный» класс энергоэффективности. При этом задание на проектирование может устанавливать более высокие классы зданий по энергоэффективности.

Предусмотрена нижеперечисленная последовательность повышения энергетической эффективности зданий в результате снижения энергопотребления системам отопления и вентиляции:

- оптимизация объемно-планировочных решений и повышение компактности здания;
- оптимизация остекления фасада;
- оптимизация уровня тепловой защиты ограждающих конструкций;
- повышение уровня автоматизации систем регулирования;
- применение в инженерных системах здания теплоутилизирующих установок;
- использование в инженерных системах здания возобновляемых источников теплоты.

Для этапов проектирования и строительства зданий **предусмотрены алгоритмы реализации требований строительных норм, предусматривающие все стадии обеспечения требуемых теплотехнических, энергетических показателей и классов энергетической эффективности с заполнением свидетельства энергетической эффективности и эксплуатационного паспорта объекта.** В дополнение к положениям действующего «Закона об энергосбережении» РБ обеспечение соответствия зданий требованиям законодательства по энергоэффективности предусматривается оценка проекта, хода и качества выполнения строительных работ, грамотности эксплуатации, сохраняющей проектные показатели теплозащиты и надежность инженерных систем.

Таким образом, наступил период разработки конструктивных элементов новых, модернизируемых и реконструируемых зданий, обеспечивающий, наконец, оптимизацию энергосбережения отапливаемых объектов. Важнейшим условием внедрения зданий высокой энергоэффективности являются знание, понимание и доверие как государственных служащих и проектировщиков, так и заказчиков и, особенно, коммунальщиков.

**Обязательным условием является комплексное, на всех стадиях проектирования согласование архитекторами, конструкторами и сантехниками на базе оценки в целом соответствию технических решений требованиям энергетической эффективности.**

Например, при необходимости предусмотреть большое остекление здания минимизацию теплотерю осуществлять за счет выбора конструкции окон повышенной теплозащиты. В итоге, проектировщики строят индивидуальную модель здания, исходя из максимально допустимых требований энергосбережения для каждого его компонента и оборудования. Идеальным является возможность использовать программное обеспечение для вычисления оптимальных значений потребления энергии для принятой модели здания.

Специалисты-проектировщики, кроме специальных знаний, должны обладать представлениями по следующим смежным вопросам:

1. Технологией производства строительных работ, свойствам и характеристикам строительных материалов, являющихся основой обеспечения требуемой теплозащиты зданий.

2. Основам теплофизики и связанными с ними методами измерений.

3. Принципами и подходами к проектированию энергетических систем объекта.

4. Взаимосвязям между приборами учета, теплоизоляцией элементов инженерных систем с выбором оптимальных решений и показателей энергосбережения.

5. Показателям и характерным особенностям, и конструкциям теплоутилизационных установок.

6. Возможностям использования альтернативных и возобновляемых источников теплоты.

Существенное значение придается проведению аудита энергетических показателей существующих зданий с целью определения возможностей и потенциала энергосбережения со значительным сокращением затрат. В развитых странах данные меры окупаются за короткий период времени (2–5 лет) за счет экономии средств на энергию и постоянного энергосбережения. Для РБ этот эффект не столь значителен из-за низких тарифов на тепловую энергию. Например, себестоимость выработки 1 Гкал тепловой энергии примерно в 4–5 раз выше тарифа, возвращающего производителю затраты. Однако грамотный энергоаудит позволит определить правильность и грамотность технических решений, основанных на комплексном обеспечении энергетических характеристик объекта, а не на минимальных значениях теплозащиты здания. Это, кроме всего прочего, оказывает содействие в реализации проекта ПРООН/ГЭФ «Повышение энергоэффективности жилых зданий в Республике Беларусь» со снижением выбросов в атмосферу парниковых газов как вновь построенных, так и модернизируемых зданий, оказывающих минимальное воздействие на окружающую среду, и поэтому называемых «зелеными зданиями».

Таким образом, концепция энергоаудита может рассматриваться не только как методика, характеризующая схемы энергопотребления и методы совершенствования энергетических показателей оцениваемого объекта, но и приведет к устойчивому зеленому строительству.

**Тепловой баланс помещений современных  
многоквартирных жилых зданий**

Шибeko A. C., Булуx Я. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрена зависимость расчётных потерь теплоты жилым зданием от сопротивления теплопередаче наружной стены, заполнения светового проёма и расчётного расхода приточного воздуха. Определена возможность компенсации расчётных теплопотерь помещений жилых зданий за счёт бытовых теплопоступлений.*

Снижение энергопотребления зданий является основной проблемой как в Беларуси, так и в Европе. Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь на отопление расходуется в среднем 59,2 % от общего конечного потребления энергии в домашних хозяйствах. В соответствии с государственной программой «Энергосбережение» на 2016–2020 годы достижение подпрограммы 1 «Повышение энергоэффективности» в жилищно-коммунальной сфере должно осуществляться увеличением сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций эксплуатируемых жилых зданий. За последние 26 лет нормативное сопротивление для наружных стен жилых зданий возросло в 1,3–1,6 раза, совмещённых покрытий и чердачных перекрытий – в 2,0 раза, окон и балконных дверей – в 1,7 раза. Однако увеличение сопротивления теплопередаче, которое в первую очередь достигается увеличением толщины теплоизоляционного слоя, влечёт за собой увеличение капитальных затрат. Ввиду этого необходимо проследить изменение показателя максимального расхода теплоты на отопление жилого здания  $q_{от}$ , Вт/м<sup>2</sup>, который рассчитывается по формуле как отношение расчётной мощности системы отопления  $Q_i$ , Вт, к суммарной общей площади квартир  $\sum F_{общ}$ , м<sup>2</sup>. С этой целью был произведён расчёт величины  $Q_i$  для жилого здания по методике, изложенной в приложении М [1]. При расчёте затрат теплоты на нагрев инфильтрующегося в жилые комнаты воздуха расчётный воздухообмен (на 1 м<sup>2</sup> площади помещения) принят 3 м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>) и 1,5 м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>) (согласно рекомендациям статьи [2]). Для прочих помещений расход инфильтрующегося через заполнения световых проёмов воздуха принимался исходя из нормативной воздухопроницаемости (10 кг/ч на 1 м<sup>2</sup> поверхности заполнения).

В результате расчётов были построены графики зависимости  $q_{от}$  от расчётного сопротивления теплопередаче наружной стены  $R_{т}^{HC}$  и светового проёма

$R_{\Gamma}^{c.n}$ , а также при различных нормах воздухообмена (рис.). Из расчётов следует, что при уменьшении удельного расхода приточного воздуха в два раза расчётная мощность системы отопления уменьшается в 1,2–1,4 раза в зависимости от приведённого сопротивления теплопередаче наружной стены и заполнения световых проёмов.

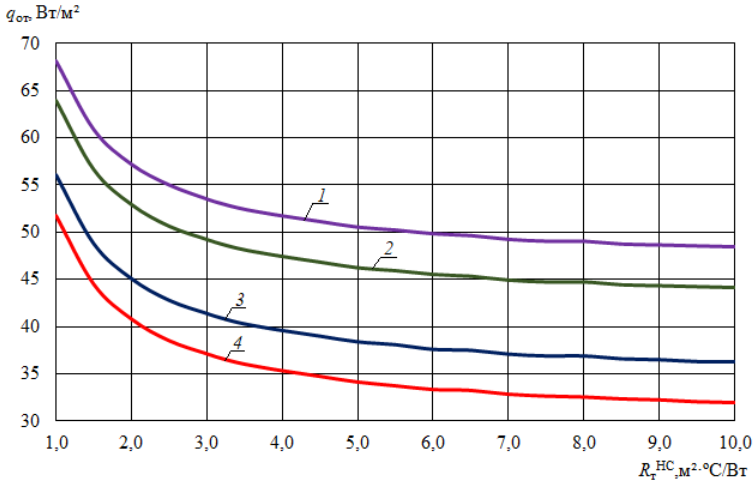


Рис. Зависимость максимального расхода теплоты на отопление жилых зданий от расчётного сопротивления теплопередаче наружной стены  $R_{\Gamma}^{HC}$ :

- 1 – при расчётном сопротивлении теплопередаче светового проёма  $R_{\Gamma}^{c.n} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и удельном расходе приточного воздуха  $3 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ ,
- 2 – при  $R_{\Gamma}^{c.n} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и  $3 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , 3 – при  $R_{\Gamma}^{c.n} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и  $1,5 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , 4 – при  $R_{\Gamma}^{c.n} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и  $1,5 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$

Анализируя графики, можно заметить, что наиболее интенсивное изменение расчётного значения  $q_{от}$  происходит при изменении сопротивления теплопередаче от  $1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  до  $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , далее темп снижается. Таким образом, при дальнейшем увеличении сопротивления теплопередаче ограждений снижение расчётных теплопотерь будет происходить всё медленнее и медленнее. Это вызвано тем, что потери теплоты через ограждения будут снижаться, но в тоже время затраты на нагрев инфильтрующегося воздуха будут постоянны. Поэтому для квартир были рассчитаны средние удельные (отнесённые к  $1 \text{ м}^2$  площади жилых комнат или кухни) теплопотери. Расчёты показывают, что при уменьшении удельного расхода приточного воздуха в два раза средние удельные потери теплоты уменьшаются в 1,3–1,7 раза (в зависимости от приведённого сопротивления теплопередаче наружной стены и этажа).

С целью установления возможности компенсации теплопотерь внутренними

теплоизбытками было рассмотрено поступление теплоты в помещения жилых зданий. Источниками регулярных поступлений теплоты являются люди, освещение, бытовая техника. Теплопоступления от людей рассчитываются на основании тепловыделения одного взрослого мужчины согласно данным проф. В. Н. Богословского [3]. Расчёт теплопоступлений от искусственного освещения (для люминесцентных и светодиодных ламп) производился по удельной (отнесённой к площади помещения) мощности, которая определялась исходя из нормативной освещённости, световой отдачи ламп и коэффициентов запаса, неравномерности и использования светового потока [4]. Учёт теплопоступлений от бытовых приборов является достаточно сложной задачей, поэтому теплопоступления определялись с помощью коэффициента загрузки  $k_{\text{зар}}$ , показывающего использование мощности в течение суток, т. е. отношение количества часов работы приборов к числу часов в сутках (24). При этом учитывалось, что потребляемая приборами электроэнергия полностью переходит в тепловую. Расчёт производился для телевизора, компьютера, утюга, холодильника, стиральной машины, плиты (газовой и электрической).

Таблица

Расчётный удельный тепловой поток,  
поступающий в помещения жилого здания

Наименование помещения	Средний удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup> , поступающий от			Расчётный удельный тепловой поток $q_h$ , Вт/м <sup>2</sup>
	людей	освещения	бытовых приборов	
Жилая комната	10,6	5,3/2,9	5,7	21,6/19,2
Кухня	–	3,0/1,7	51,7/126,0	при электроплитах – 54,7/53,4; при газовых плитах – 129,0/127,7
Ванная	–	1,2/0,7	21,3	22,5/22,0
Коридор и туалет	–	0,4/0,2	–	0,4/0,2

Примечание. Значения перед косой чертой соответствуют установке люминесцентных ламп, после – светодиодных.

На основании расчётов были сделаны следующие выводы.

1. Расчётные бытовые тепловыделения в жилых комнатах полностью не компенсируют расчётные теплопотери, однако доля их в общем тепловом балансе существенна, и они могут покрывать (в зависимости от расчётного сопротивления теплопередаче заполнения светового проёма, этажа и типа ламп) при норме воздухообмена  $3,0 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$  – 20,5–43,3 %; при норме воздухообмена  $1,5 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$  – 26,4–68,8 %.

2. Для кухонь с электроплитами расчётные тепловыделения могут компенсировать расчётные теплопотери для промежуточного этажа при

расчётном сопротивлении теплопередаче наружной стены свыше  $6,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  (при расчётном сопротивлении теплопередаче заполнения светового проёма  $0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ) или  $2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  (при  $R_{\text{т}}^{\text{с.п.}} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ).

При  $R_{\text{т}}^{\text{с.п.}} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и  $R_{\text{т}}^{\text{НС}} = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  поступающий удельный тепловой поток может компенсировать на первом этаже – до 81,2 % расчётных теплопотерь; на последнем этаже – до 83,5 %. При расчётном сопротивлении теплопередаче заполнения светового проёма  $1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  выделяющийся удельный тепловой поток полностью компенсируют удельные теплопотери при расчётном сопротивлении теплопередаче наружной стены свыше  $5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  (для первого этажа) и  $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  (для последнего). Таким образом, при расчётном сопротивлении теплопередаче светового проёма  $1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и наружной стены  $6,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  потери теплоты могут полностью компенсированы тепловыделениями.

3. Для кухонь с газовыми плитами тепловыделения ещё более существенны и могут покрывать расчётные трансмиссионные теплопотери, однако значительная часть теплопотерь будет идти на нагрев воздуха, необходимого на горение. При расходе поступающего наружного воздуха, превышающем требуемый для горения, затраты будут расти прямо пропорционально инфильтрирующемуся расходу и увеличивать расчётные теплопотери кухни.

4. Для ванных комнат и туалетов, расположенных у внутренних ограждений, бытовые тепловыделения будут удаляться с уходящим воздухом. При расположении данных помещений у наружных стен требуется установка отопительных приборов, т. к. тепловыделения в них несутся.

### Литература

1. СНБ 4.02.01–03\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Текст]. – Взамен СНиП 2.04.05–91 ; введ. 01.01.05. – Минск : Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2015. – 77 с.
2. Борухова, Л. В. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий [Текст] / Л. В. Борухова, А. С. Шибeko // Наука и техника. – Т. 17. – 2018. – № 4. – С. 306–313.
3. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) [Текст] : учебник для вузов / В. Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
4. Кноринг, Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения [Текст] / Г. М. Кноринг [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 1992. – 448 с.

**Эффективность применения тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения в условиях Республики Беларусь**

Барановский И. В.<sup>1</sup>, Башко Ю. А.<sup>1</sup>, Козорез А. С.<sup>2</sup>, Лихтар С. А.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ГНУ «Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси»  
<sup>2</sup>ОАО «Завод Промбурвод»  
Минск, Республика Беларусь

*Приведен краткий анализ эффективности применения различных типов тепловых насосов, в зависимости от используемых источников тепловой энергии (грунт, вода, воздух), отражен накопленный ОАО «Завод Промбурвод» опыт применения в республике тепловых насосов со всеми источниками тепла для отопления зданий и горячего водоснабжения, показана эффективность их применения в условиях Республики Беларусь.*

В Республике Беларусь от общего количества вырабатываемой тепловой энергии около 37,5 % (по данным Департамента энергоэффективности) потребляет жилищный фонд для нужд отопления и горячего водоснабжения. Производство такого количества тепла предполагает потребление около 3,7 млрд кубометров природного газа.

В ближайшей перспективе планируется снижение объемов потребления углеводородов в жилом секторе для целей отопления и горячего водоснабжения в связи с предстоящим вводом Белорусской АЭС. В настоящее время строительная отрасль страны ориентироваться на возведение домов с электроотоплением. В Беларуси в 2020 году планируется построить около 46 тыс. кв. м жилья, где для отопления и горячего водоснабжения будет использоваться электрическая энергия.

Повысить эффективность использования электроэнергии, снизить её расход на отопление и горячее водоснабжение жилого фонда позволит использование геотермальных систем, которые работают по принципу отбора тепла природных ресурсов-накопителей: грунт, подземные и наземные воды, серые стоки, воздуха и др. аккумулирования и передачи потребителю. Эффективность их работы гораздо выше, чем у традиционных котлов (в том числе твердотопливных), нагревателей и т.п. Каждый затраченный киловатт электроэнергии позволяет получить от 3 кВт и более тепловой энергии.

Существует три типа тепловых насосов, в зависимости от используемых источников тепла: тепловая энергия земли – геотермальный («рас-сол/вода»), энергия воды – гидротермальный («вода/вода») и энергия воздуха – аэротермальный («воздух/вода») [1].



В условиях Республики Беларусь ОАО «Завод Промбурвод» успешно реализовал ряд проектов применения тепловых насосов со всеми источниками тепла для целей тепло-водоснабжения. В ОАО «Завод Промбурвод» с 14 декабря 2012 г. начата эксплуатация опытного образца теплового насоса собственного производства с отбором тепла от грунта для нужд отопления и горячего водоснабжения собственной столовой. Система тепло-водоснабжения построена на базе высокоэффективного теплового насоса типа «рассол-вода» с отбором тепла от грунтового теплообменника.

За время зимней эксплуатации теплового насоса на отоплении можно сделать вывод, что насос работает стабильно и эффективно вне зависимости от температуры окружающей среды. Опыт эксплуатации показывает, что в зимний период при стабильной температуре воздуха окружающей среды до минус 10 °С тепловой насос отапливал не только обеденный зал столовой площадью 100 м<sup>2</sup>, но и полностью помещение столовой, гараж и подсобные помещения общей площадью 582 кв. м. Температура в помещениях в процессе эксплуатации комфортная.

За месяц эксплуатации теплового насоса расход электроэнергии составил 2100 кВт или 0,6 т.у.т., а затраты на обогрев – 300 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.). В тоже время при централизованном отоплении на это помещение тратили 16,7 Гкал или 2,9 т.у.т. Затраты на обогрев при централизованном отоплении составляли 835 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.). Затраты на изготовление и монтаж теплового насоса составили 15 100 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.). Окупаемость данного проекта составила 4 года. Отказов и нарушений работы теплового насоса за время работы не наблюдалось.

С наступлением летнего сезона при отключении отопления столовой, тепловой насос работает на получение горячей воды для столовой и бытовых нужд [2]. В производственных условиях республики для целей тепло-водоснабжения с 1 сентября 2013 г. введен в эксплуатацию тепловой насос в административно-бытовом здании производственной базы комплектации РО «Белагросервис» г. Фаниполь.

Тепловой насос тепловой мощностью 54,3 кВт с отбором тепла от грунта для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения двухэтажного административно-бытового здания площадью 947,7 кв. м и общим строительным объемом 2980,2 м куб. Система теплоснабжения построена на базе высокоэффективного теплового насоса с отбором тепла от грунтового теплообменника.

Главным преимуществом теплового насоса является его экономичность. Чтобы передать в систему отопления 53,4 кВт·ч тепловой энергии, оборудованию необходимо затратить всего лишь 15...18,8 кВт·ч электроэнергии. Тепловые насосы упрощают требования к системам вентиляции помещения

и увеличивают уровень пожарной безопасности. Все системы данного устройства функционируют с использованием замкнутых контуров и требуют минимальных эксплуатационных затрат [3].

ОАО «Завод Промбурвод» успешно реализовал проекты со всеми источниками тепла на эксплуатируемых объектах водоканалов республики – на станциях сточных вод и обезжелезивания, на которых не требуются сложные и затратные строительно-монтажные работы.

На КУП «Молодечноводоканал» внедрен геотермальный тепловой насос. В водоприемнике сточных вод канализационной насосной станции смонтирован спиральный теплообменник, который позволил отказаться от буровых работ и снизить стоимость оборудования с монтажом до 15 492 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.). Расчет теплообменника в виде трубчатого змеевика к тепловому насосу позволил снизить стоимость оборудования до 40 %.

Средний расход тепловой энергии в существующей системе составлял 180 кВт в сутки, тепловой насос тратит 55 кВт в сутки. Экономия в денежном выражении за отопительный сезон составила 6 100 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.), что говорит об окупаемости инвестиций в 2,5 года без учета горячего водоснабжения. В случае наличия воды появляется более бюджетный вариант – это гидротермальный тепловой насос («вода/вода»). Устройство данного теплового насоса схоже с геотермальным. Очень хорошим примером применения таких насосов могут быть станции обезжелезивания на водозаборах предприятий, городов и поселков. В данном случае не потребовалось изготовления зонда первого контура, а вместо него, тепловой насос подключён к подающему водопроводу. Стоимость данного теплового насоса составила 14 640 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.) вместе с монтажными и пусконаладочными работами.

Каждый тип тепловых насосов обладает собственными величинами капитальных затрат на его приобретение, эксплуатацию и использование источника тепла.

Принцип работы аэротермального теплового насоса («воздух/вода») довольно прост: один или несколько наружных блоков захватывают энергию из холодного воздуха. Энергия, извлеченная из этого воздуха, нагревает жидкий теплоноситель. После нагрева теплоноситель будет нагревать воду из системы, которая поставляется в низкотемпературные приборы отопления (фанкойлы или системы теплых полов). В дополнение к подготовке горячего водоснабжения, высокотемпературные модели насосов обеспечивают отопление для существующей сети высокотемпературных радиаторов отопления.

Примером внедрения аэротермального теплового насоса можно привести Церковь Святого Михаила в Сынковичах, которая является объектом

Государственного списка историко-культурных ценностей Республики Беларусь. Историческая ценность храма не позволяет подключить к центральному отоплению. Стоимость оборудования вместе с пусконаладочными работами составила 13 860 бел. руб. (в ценах на 01.01.2019 г.). Эксплуатационные затраты в виде оплаты за электроэнергию снизились в четыре раза. Стоимость воздушных тепловых насосов ниже, так как нет необходимости в дорогом бурении, затратные земляные работы тоже проводить не надо. Однако эксплуатационные расходы в этом случае немного выше. А вот грунтовый и водяной насосы по эксплуатационным затратам более эффективны, а в качестве бонуса предоставляют еще и «пассивный» холод на летний период.

Эффективность применения тепловых насосов для целей отопления и горячего водоснабжения подтверждает опыт использования их ОАО «Завод Промбурвод для отопления и горячего водоснабжения одиночно стоящих жилых и производственных зданий и сооружений» в условиях Республики Беларусь, который может получить широкое распространение в сфере жилищно-коммунального хозяйства для повышения энергоэффективности и уровня комфорта индивидуальных и многоквартирных жилых домов.

### Литература

1. Трубаев, П. А. Тепловые насосы [Текст]: Учеб. пособие / П. А. Трубаев, Б. М. Гришко, – Белгород: Изд-во БГТУ им. Шухова, 2009.– 142 с.
2. Эффективность эксплуатации теплового насоса собственного производства [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://promburvod.com/novosti.html>. – Дата доступа: 12.09.2019.
3. Введен в эксплуатацию тепловой насос на базе комплектации РО «Белагросервис» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://promburvod.com/novosti.html>. – Дата доступа: 12.09.2019.

УДК 697.331

### **Методика эффективной гидравлической наладки автоматизированных водяных систем тепло- и холодоснабжения**

Покотиллов В. В., Харитончик А. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Предложена новая методика гидравлической наладки систем, основанная на единой физической модели с применением характеристик сопротивления, как для трубопроводов, так и для клапанов. Впервые предложено при наладке оценивать клапаны по характеристике сопротивления вместо*

*пропускной способности, а авторитет клапана оценивать отношением характеристик сопротивления клапана и регулируемого участка вместо отношения сопротивлений. Методика позволяет создавать эффективные и простые в реализации методы наладки применительно к различным видам систем на основании анализа по отдельным узлам и веткам системы.*

Методы гидравлической наладки эволюционировали с технологическим развитием систем тепло- и холодоснабжения и измерительной техники.

При наладке систем отопления «методом температурного перепада» контролировалась степень равномерности распределения температуры поверхности радиаторов, а также температурные перепады в отдельных узлах, ветках и в системе в целом [1, 2]. Измерения проводились по достижению стационарного теплового режима. На основании измерений вычислялось долевое и балансовое распределение теплоносителя, определялись требуемые изменения сопротивления на отдельных ветках, и устанавливались соответствующие дроссельные диафрагмы. «Метод температурного перепада» имеет множество субъективных факторов, низкую точность и, как правило, не применяется для автоматизированных систем с индивидуальным регулированием.

Для современных автоматизированных водяных систем (АВС) разработаны методы «предварительной настройки клапанов», «пропорциональный и компенсационный» [3,4], которые построены на применении измерительных компьютеров и балансовых клапанов (БК), встроенных в систему. Соответственно предварительно измеряются расходы теплоносителя  $G$ , кг/ч на отдельных ветках и участках, перепады давления на отдельных участках  $\Delta P_{Уч}$ , Па, на регулируемых участках (РУ)  $\Delta P_{Р.У.}$ , Па, на регулирующих органах (РО)  $\Delta P_{Р.О.}$ , Па, на теплообменниках и потребителях  $\Delta P_{ПОТР}$ , Па, на регуляторах и другом оборудовании  $\Delta P_{ОБОР}$ , Па. По результатам предварительных измерений вычисляются соотношения измеренных  $G_{ИЗМ}$ , кг/ч и проектных  $G$ , кг/ч значений расходов теплоносителя, а также условная пропускная способность клапана  $k_{VS}$ , м<sup>3</sup>/ч, авторитет клапана  $a_V$  (или модуль клапана  $n_V$ ):

$$k_{VS} = \frac{G}{\sqrt{10 \cdot \Delta P_{Р.О.}}}; \quad a_V = \frac{\Delta P_{Р.О.}}{\Delta P_{Р.У.}}; \quad n_V = \frac{\Delta P_{ПОТР}}{\Delta P_{Р.О.}}; \quad n_V = \frac{1}{a_V} - 1. \quad (1)$$

Трое наладчиков выполняют наладочные работы, координируя по радиосвязи свои действия между собой с помощью БК и измерительных компьютеров по соответствующему плану наладки, составленному на основании предварительных результатов измерений. Заданные значения расходов по отдельным РУ достигаются последовательным повторением плана наладки при поддержании вручную постоянного заданного общего расхода в АВС.

Указанные методы имеют множество недостатков. Основным из них считаем использование различных физических моделей в пределах решения единой задачи. Полученные в итоге наладки результаты являются при этом функционально зависимыми величинами от изменяемых перепадов давлений. Подобная проблема с использованием разных физических моделей в пределах единой методики гидравлического расчета АВС была нами решена путем приведения к единой физической модели с применением характеристики сопротивления для трубопроводов и клапанов [5]. Указанные принципы использованы нами при разработке эффективной методики гидравлической наладки АВС.

Предлагаем оценивать клапаны по характеристике сопротивления  $S_{VS}$  вместо пропускной способности  $k_{VS}$ , а авторитет клапана  $a_V$  оценивать отношением характеристик сопротивления клапана и регулируемого участка вместо отношения сопротивлений:

$$S_{VS} = \frac{0,1}{(k_{VS})^2}; \quad a_V = \frac{S_{VS}}{S_{P.Y.}}; \quad n_V = \frac{S_{ПОТР}}{S_{VS}}, \quad (2)$$

где  $S_{VS}$ ,  $S_{P.Y.}$ ,  $S_{ПОТР}$ , – характеристика сопротивления соответственно клапана, регулируемого участка, потребителя, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>.

Характеристика сопротивления регулируемого участка  $S_{P.Y.}$ , потребителя  $S_{ПОТР}$ , узла  $S_{УЗЛА}$  или ветки АВС вычисляется на основании результатов предварительных измерений соответствующих расхода  $G_{ИЗМ}$ , кг/ч и перепада давления  $\Delta P_{ИЗМ}$ , Па по выражению:

$$S_{ИЗМ} = \Delta P_{ИЗМ} / (G_{ИЗМ})^2. \quad (3)$$

При этом измерения  $G_{ИЗМ}$  и  $\Delta P_{ИЗМ}$  могут выполняться для отдельных веток, узлов и системы в целом при любом режиме эксплуатации АВС, в том числе при частичном отключении некоторых веток и узлов.

Целью предварительных измерений является получение характеристик сопротивления  $S_{ИЗМ}$  для каждого элемента АВС. Измеренные значения  $S_{ИЗМ}$  следует сравнить с соответствующими проектными значениями  $S_{ПРОЕКТ}$  на соответствие сравниваемых значений (в случае выполнения проекта АВС по методике [5]). При соответствии сравниваемых значений испытания можно считать законченными.

Если отсутствуют проектные значения  $S_{ПРОЕКТ}$ , то измеренные значения  $S_{ИЗМ}$ , являющиеся гидравлическими константами, используются для определения требуемых значений  $\Delta P_{ТРЕБ}$ , обеспечивающих проектные значения расходов теплоносителя  $G$ :

$$\Delta P_{ТРЕБ} = S_{ИЗМ} \cdot G^2. \quad (4)$$

Разработанная методика гидравлической наладки автоматизированных водяных систем позволяет создавать эффективные и простые в реализации методы наладки применительно к различным видам систем на основании предварительных измерений и анализа полученных результатов по

отдельным узлам и веткам системы. Рассмотрим вариант разработки метода наладки для двухтрубной системы отопления, показанной на рисунке.

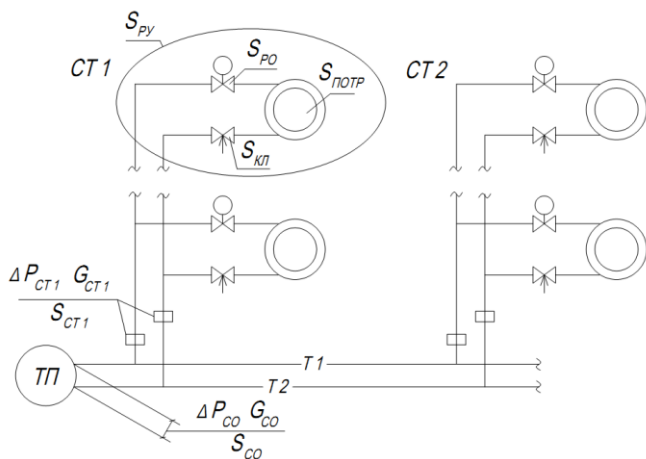


Рис. Схема двухтрубной системы отопления

Схема показана в упрощенном виде, не показаны запорные клапаны, дренажные краны и др. Характеристика сопротивления  $S_{ру}$  определяется суммой  $S_{ро}$ ,  $S_{потр}$ ,  $S_{кл}$ , вычисленных по выражению (2). Характеристика сопротивления  $S_{СТ1}$  вычисляется по правилам определения при параллельно-последовательном соединении узлов. В то же время  $S_{СТ1}$  вычисляется по измеренным значениям  $\Delta P_{СТ1}$  и  $G_{СТ1}$  с помощью измерительного компьютера, присоединяемого к измерительным штуцерам измерительной диафрагмы стояка и запорного клапана стояка. На основании сравнения расчетных и измеренных значений  $S_{СТ1}$  строится план наладки стояка. Таким образом, выполняются измерения и наладка по элементам системы отопления на требуемые значения характеристик сопротивления. После наладки отдельных элементов системы, узлов и стояков измеряются и рассчитываются значения  $\Delta P_{CO}$ ,  $G_{CO}$ ,  $S_{CO}$ .

Все полученные результаты измерений и расчетов гидравлических констант  $S_i$  вносятся в паспорт системы. В паспорте следует указать подробный план проведения гидравлической наладки системы отопления.

Предлагаемая новая методика гидравлической наладки систем тепло- и холодоснабжения позволяет создавать эффективные и простые в реализации методы наладки применительно к различным видам систем на основании анализа результатов измерений и расчетов по отдельным узлам и веткам системы.

## Литература

1. Белоусов, В. В. Пуск и наладка систем центрального отопления. [Текст] // В. В. Белоусов // М.: Госстройиздат. – 1953. – 224 с.
2. ТКП 458-2012(02230) Правила технической эксплуатации теплоустановок и тепловых сетей потребителей.
3. Пырков, В. В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. [Текст] / В. В. Пырков // К.: ДП «Такі справи». – 2010. – 304 с.
4. Р НОСТРОЙ 2.15.4-20011. Рекомендации по испытанию и наладке систем отопления, теплоснабжения и холодоснабжения. - М: 2012 – 108 с.
5. Китиков, В. О. Метод гидравлического расчета энергоэффективных систем тепло- и холодоснабжения зданий [Текст] / В. О. Китиков, В. В. Покотиллов // Энергоэффективность, департамент по энергоэффективности ГК по стандартизации РБ. – 2019. – № 11 (265). – С. 24–29.

УДК 620.92:662.6.

### Современные пути получения синтетических углеводородов. Технология GTL

Эшмухамедов М. А., Кавкатбеков М. М, Абдувалиев А. А,  
Рахматов А. А, Понамарёва Т. В.  
Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова  
Ташкент, Республика Узбекистан

*В работе рассмотрены основы получения синтез-газа. Приведены основные аспекты, примеры промышленного применения, перспективы развития технологии GTL. Произведен частичный обзор строящихся и проектируемых в Узбекистане заводов по переработке природного газа по технологии GTL.*

Промышленное производство синтетического углеводородного топлива по Фишеру и Тропшу было реализовано в Германии перед Второй мировой войной, а затем возобновлено около 40 лет назад в Южно-Африканской Республике. Реакция Фишера-Тропша – это гетерогенный каталитический процесс, в ходе которого из смеси CO и H<sub>2</sub> (так называемый синтез-газ, который в то время предполагалось получать газификацией угля) образуется смесь жидких углеводородов [1].

Этот синтез осуществляется при давлении 10–15 МПа и температуре 360–420 °С в присутствии железного катализатора, промотированного КОН. В присутствии же кобальта при давлении 3 МПа и температуре 200 °С преимущественно образуются углеводороды. Различные пути получения жидких синтетических топлив из углеродного сырья получили название по виду сырья: из природного газа (Gas to Liquids – GTL), из угля (Coal to

Liquids – CTL) и из биомассы (Biomass to Liquids – BTL). Общий термин для обозначения всех этих процессов – XTL, где буква X соответствует виду сырья. Различные виды сырья при переработке в разных процессах XTL могут давать одну и ту же номенклатуру продукции, так как общим промежуточным продуктом всех процессов является синтетический газ (синтез-газ) [2]. Синтез-газ является исходным сырьем для производства многих химических и нефтехимических продуктов (метанол и другие оксигенаты, продукты синтеза Фишера-Тропша), а также используется для восстановления железной руды. Преобладающим сырьем для производства синтез-газа по-прежнему остаются природный газ и легкие углеводороды (попутный газ или прямогонный бензин). Основным методом переработки природного газа является паровая конверсия метана (после парциального окисления метана кислородом и автотермического риформинга, который представляет собой комбинацию парциального окисления и паровой конверсии) [3]. Современные разработчики придерживаются «классического» оформления GTL (рис.).

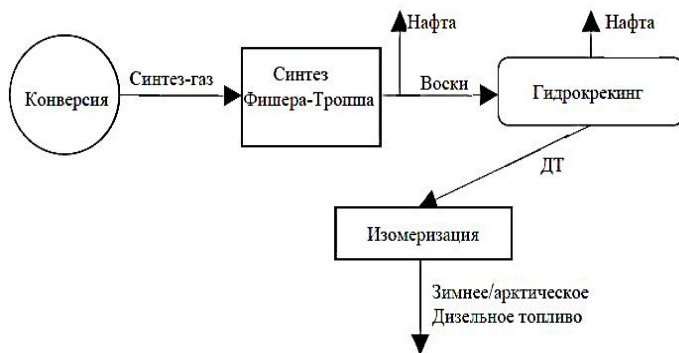
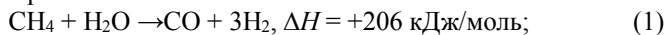


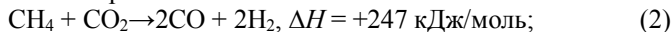
Рис. Основные стадии процесса GTL

Это гетерогенно-каталитические цепные реакции, инициируемые первичным кислородсодержащим интермедиатом, образующимся из CO и H<sub>2</sub>. Общим для рассматриваемого механизма этих реакций является представление о стадии роста углеродной цепи как о последовательном присоединении одноуглеродных фрагментов. Например, процесс получения синтез-газа из природного описывается тремя основными реакциями:

1. паровая конверсия:

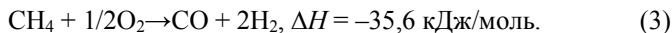


2. уголекислотная конверсия:



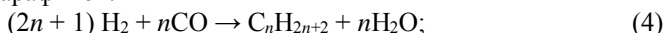


3. парциальное окисление:



Преимуществами метода парциального окисления являются энергетическая независимость; простое аппаратное оформление; процесс некаталитический, а значит отсутствие катализаторов и уменьшение затрат на сжатие синтез-газа, поскольку реактор, его производящий, находится под высоким давлением. Минусы данного способа – необходимость в кислороде, недостающего для ряда приложений отношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  и возможность образования сажи. Следующая стадия, процесс Фишера-Тропша. В настоящее время эксплуатируются несколько технологических вариантов синтеза Фишера–Тропша, которые описываются следующими уравнениями:

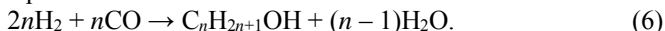
– получение парафинов:



– получение олефинов:



– получение спиртов:



Строящийся на юго-западе Узбекистана в Кашкадарьинской области завод по производству синтетического жидкого топлива Uzbekistan GTL будет третьим в мире подобным заводом. основанным на технологии «Sasol» Gas to Liquids (газ в жидкость). Согласно расчетам, реализация проекта даст возможность обеспечить ежегодное импортозамещение нефтепродуктов, т. к. завод ежегодно будет выпускать более 1,5 млн тонн высококачественного синтетического жидкого топлива, соответствующего стандарту ЕВРО 5, под торговой маркой Oltin Yo'l GTL. Производство завода составит:

– 743,5 тыс. тонн дизельного топлива;

– 311 тыс. тонн авиакеросина;

– более 431 тыс. тонн нефти;

– более 50 тыс. тонн сжиженного газа.

### Литература

1. Мордкович, В. З. Прошлое, настоящее и будущее GTL [Текст] / В. З. Мордкович // Химия и жизнь. – 2007. – №8. – С.4–10.

2. Эльверс, Б. Топлива. Производство, применение, свойства. Справочник: пер. с англ. [Текст] / под ред. Т. Н. Митусовой. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 416 с.

3. Оостеркамп, Ван ден. Достижения в производстве синтез-газа [Текст] // Ван ден Оостеркамп, Вагнер Э., Росс Дж // Российский химический журнал. – Том XLIV (2000). – №1. – С.34–42.

## Измерение загрязнителей атмосферного воздуха газоанализатором

Ахмедов Г., Зокирова З., Каюмова И. К., Рахимова Л. С.

Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова,  
Ташкент, Республика Узбекистан

*Настоящая работа посвящена теоретическому обоснованию и экспериментальному подтверждению возможности разработки, создания газоанализатора для непрерывного автоматического селективного определения метана (природного газа) и паров бензина в газовых средах. Разработанный газоанализатор на основе сенсорного датчика применен в газовых смесях углеводородов в диапазоне концентраций 0–1410 мг/м<sup>3</sup> с погрешностью, не превышающей 5 %. Высокая чувствительность и экспрессное измерение газов показывает преимущество газоанализатора по сравнению с существующими.*

Одной из задач в области охраны окружающей среды и борьбы за сохранение чистоты воздушного бассейна является систематический контроль за изменением содержания в ней загрязнителей. Зная содержание основных загрязнителей, можно оценить их воздействие на флору и фауну, предупредить накопление вредных компонентов в окружающей среде.

Углеводороды являются распространителями вредных веществ атмосферного воздуха из-за процессов испарения и горения нефтепродуктов; выбросов предприятий нефтехимии; выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания и многих других промышленных и природных процессов.

Для измерения состава газовых смесей применяются различные типы газоанализаторов, ячейки, сенсоры и другие приборы [1]. В существующих газоанализаторах используются химические, физико-химические и физические методы анализа [2].

Разработка современных газоанализаторов для точного и быстрого определения углеводородов на различных объектах является одной из актуальных задач. Неотложный контроль содержания углеводородов требуется для производственных помещений предприятий, автотранспорта, теплоэнергетики, металлургии, химической промышленности и др. Приборы для измерений углеводородов должны обладать экспрессностью определения, малыми размерами и массой.

С учетом специфики решаемой задачи нами разработан газоанализатор на основе базового датчикового сенсора, работающего как в стационарном, так и в переносном варианте.

Принцип действия сенсора основан на измерении концентрации определяемого компонента газовой смеси по количеству теплоты, выделяющейся при химической реакции каталитического окисления. На рисунке представлена принципиальная электрическая схема датчика сенсора. В конструктивном плане сенсор представляет собой пару чувствительных элементов и пару резисторов, включенных в мостовую схему. Оба чувствительных элемента находятся в реакционной камере.

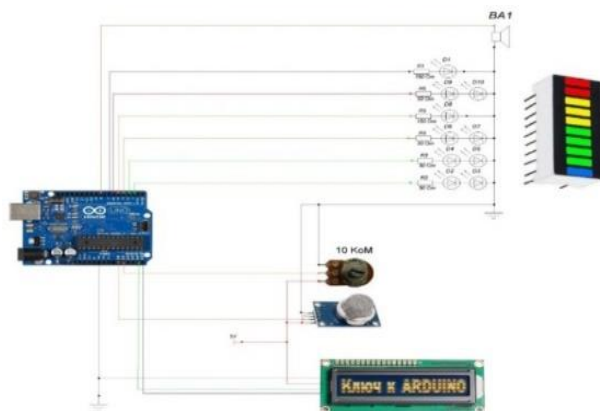


Рис. Принципиальная схема датчика сенсора

Датчик относится к полупроводниковым приборам. Принцип работы датчика основан на изменении сопротивления тонкопленочного слоя  $\text{SnO}_2$  при контакте с молекулами определяемого газа. Чувствительный элемент датчика состоит из керамической трубки с покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и нанесенного на неё чувствительного слоя диоксида олова. Для определения по логическому уровню также имеется цифровой выход. На модуле датчика есть встроенный потенциометр, который позволяет настроить чувствительность датчика в зависимости от того, насколько точно необходимо регистрировать уровень газа.

### Литература

1. Зуев, Б. К. Пьезокаталитический сенсор для определения горючих газов в воздухе [Текст] / Б. К. Зуев, А. Ю. Оленин // Журнал аналитической химии. – 2002. – Т. 57. – № 4. – С. 42.
2. Woloszyn, Th. F. Prediction of gas chromatographic retention data hydrocarbons from nophthas [Text] / Th. F. Woloszyn // Analyt. Chem. – 1993. – Vol. 65. – № 8. – P. 587.

**Температурный режим воздушного пространства многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-арена»**

Ливанский Д. Г.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*«Минск-арена» – одна из крупнейших по вместительности ледовых площадок Европы. «Минск-арена» – комплекс уникальный; по многофункциональности, сложности технического исполнения, оборудованию и оснащению – аналогов в Республике Беларусь нет. Разработана математическая модель внутреннего воздушного пространства многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-арена» в г. Минске для выявления параметров температурно-влажностного режима воздушной среды с целью снижения энергетических затрат на системы кондиционирования воздуха и холодоснабжения ледовой арены.*

Исследование тепло- и массообменных процессов воздушного пространства катка с ледовой поверхностью проводится путем решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена с учетом турбулентности и радиационного теплообмена. В условиях работы механической вентиляции движение воздуха является турбулентным. Для учета турбулентного характера движения воздуха использована  $k-\epsilon$  модель турбулентности.

При решении системы дифференциальных уравнений начальные условия, по возможности, выбираются максимально близкими к реальным полям распределения параметров микроклимата, чтобы сократить время счета. Граничные условия в свою очередь определяются физикой задачи. Например, на поверхностях омываемых потоком твердых тел задается условие прилипания. Для уравнения переноса теплоты используют граничные условия первого, второго, третьего или четвертого рода.

*Описание объекта и систем вентиляции и кондиционирования воздуха*

Здание ледовой арены в плане имеет форму «шайбы», диаметр которого по внешнему кольцу составляет приблизительно 128 м, а зрелищного зала – 116 м. В центре арены расположена хоккейная коробка международного стандарта 60x30 м. Площадь ледового поля 1740 м<sup>2</sup>. Высота здания арены составляет 35 м. Ледовая площадка имеет ограждение высотой 2,2 м вдоль длинной стороны катка и высотой 3,2 м вдоль короткой стороны. Кругом по периметру ледовой площадки расположены зрительские трибуны, общим количеством 15 000 мест. Зрелищный зал арены обслуживают несколько

систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Перечень данных систем приведен в табл. и рис. 1.

Таблица

Системы вентиляции и кондиционирования воздуха, обслуживающие зрелищный зал арены

Приточные системы		Вытяжные системы	
	Зона обслуживания		Зона обслуживания
AA	Подача воздуха под сиденья мест для зрителей на среднем ярусе трибун	EAB	Удаление воздуха из верхней зоны по периметру зала (стен)
AB	Подача воздуха под сиденья мест для зрителей на верхнем ярусе трибун		
AP	Подача воздуха в зону ледовой площадки	EAP	Удаление воздуха с нижней зоны (с пола) по периметру ледовой площадки
AL	Подача воздуха в верхнюю зону	EAL	Удаление воздуха с верхней зоны

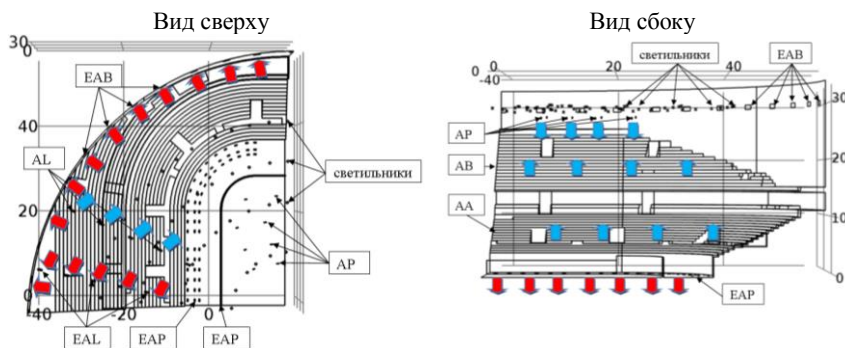


Рис. 1. Виды сверху и сбоку расчетной области с размещением светильников, приточных и вытяжных устройств, зон обслуживания системами вентиляции и кондиционирования воздуха (Синие стрелки показывают направление подачи воздуха в помещение, красные стрелки – направление удаления воздуха из помещения)

Расчетная область содержит фрагмент внутреннего пространства катка. Фрагмент представляет собой четверть объема зала с ледовой площадкой и получен отсечением от внутреннего пространства катка плоскостями  $x = 0$  м (плоскость симметрии) и  $y = 0$  м (плоскость симметрии). Высота расчетной области (от поверхности льда до низа покрытия) составляет 33 м. Протяженность вдоль оси  $x$  равняется 58 м.

Результаты моделирования приведены на рис. 2–3.

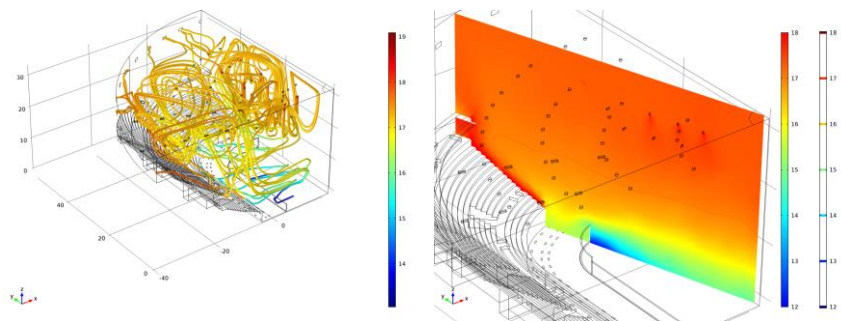


Рис. 2. Визуализация воздушных потоков, подаваемых приточной системой АР (изометрия) и температура воздуха по высоте помещения по сечению

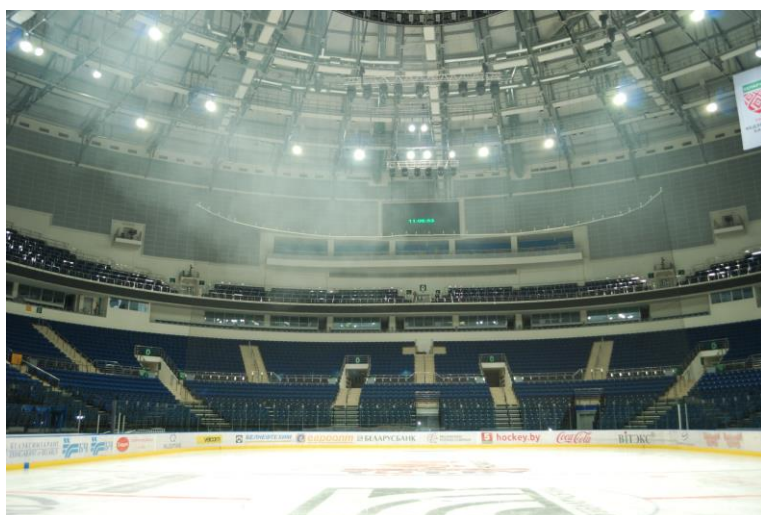


Рис. 3. Визуализации воздушных потоков системы АР в результате задымления воздуха

Система АР подает воздух на ледовую площадку струями, направленными вертикально вниз. Как видно из рис. 2 на расстоянии примерно 10 м от воздухораспределителя струя разворачивается в сторону либо вверх.

Прямого воздействия струи на лед не наблюдается. Зона ледовой площадки вентилируется нисходящими потоками воздуха.

Следует отметить, что движение воздуха наблюдается во всем объеме Арены.

#### *Визуализация воздушных потоков*

Цель визуализации воздушных потоков заключалась в верификации адекватности математической модели реальным физическим процессам, а также в определении наличия влияния приточных струй на качество льда ледовой арены. Визуализация воздушных потоков производилась с помощью дымовых шашек, специально предназначенных для применения в системах вентиляции. Приборы освещения были включены в режиме проведения телевизионной съемки.

Для визуализации воздушных потоков от воздухораспределителей была выбрана приточная система AP, обслуживающая зону над ледовой площадкой. Система AP подает воздух через воздухораспределители, расположенные на высоте 26 м сосредоточенными струями и направленными вертикально вниз на лед, либо под углом в сторону зрителей.

Задымление потока приточного воздуха производилось при совместной работе приточных и вытяжных установок (AP, AL, EAL, AA, AB, EAB + EAP) обслуживающих помещение ледовой арены.

Далее, на рис. 3 представлен результат визуализации воздушных потоков системы AP в результате задымления воздуха.

Воздушный поток от воздухораспределителей системы AP опускается на высоту  $\approx 8$  м от ледовой площадки. В результате работы системы EAP, которая удаляет воздух с нижней зоны на уровне пола вокруг ледовой площадки, тем самым несколько увеличив длину распространения струи от воздухораспределителей системы AP. Далее струя рассеивается и прямого воздействия на лед не оказывает.

Разработанная математическая модель внутреннего воздушного пространства многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-арена» расположенного в г. Минске адекватно отражает температурно-влажностный режим воздушной среды зрелищного зала арены. Полученные результаты измерений параметров воздуха и расчетные значения математической модели отличаются не более 10 %.

На основе результатов математического моделирования были разработаны рекомендации по снижению энергетических затрат на системы кондиционирования воздуха и холодоснабжения ледовой арены.

Прямого воздействия приточных струй на поверхность льда и как результат ухудшение его качества не наблюдается.

## Преимущества применения предварительно разогретых заполнителей при тепловлажностной обработке железобетонных изделий

Сизов В. Д.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Приведены аналитические расчеты и графические зависимости времени подъема температуры изделий и коэффициента полезного использования тепловой энергии в зависимости от начальной температуры бетонной смеси, которые показывают преимущества применения предварительно разогретых заполнителей.*

Анализ действующих нормативных документов по изготовлению наружных ограждающих конструкций показал, что основным нормативным документом по тепловлажностной обработке бетона (ТВО) является ТКП 45-5.03-13-2005 (02250) [1], в котором отражены все возможные варианты тепловой обработки изделий и принципы определения эффективности тех или иных мероприятий, которые оказывают влияние на сокращение расходов тепловой энергии.

К одним из таких мероприятий относится и процесс ТВО с использованием предварительного электро- и пароразогрева бетонной смеси, однако, варианты с использованием предварительно разогретых заполнителей в приведенном документе не рассматриваются.

Тем не менее, используя методики, разработанные в [1] можно показать преимущества применения предварительно разогретых заполнителей, которое оказывает определяющее влияние на снижение времени ТВО и повышает эффективность процесса в целом.

Например, при расчете рациональных режимов беспрогревного выдерживания изделий по методике [1] ориентировочная средняя температура определяется как:

$$t'_{\text{cp}} = t_{\text{б.см.}} + \Delta t_{\text{м1}} + 2 \cdot 10^{-2} (\Pi_{\text{cp}} - 300) - 0,85 (M_{\text{cp}} - 1),$$

где  $t_{\text{б.см.}}$  – начальная температура бетонной смеси, °С;  $\Delta t_{\text{м1}}$  – приращение температуры изделий;  $\Pi_{\text{cp}}$  – среднее содержание цемента в бетоне, кг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{cp}}$  – средний модуль поверхности, м<sup>-1</sup>.

При  $t_{\text{б.см.}} = +18$  °С;  $\Pi_{\text{cp}} = 280$  кг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{cp}} = 15$  м<sup>-1</sup>;  $\Delta t_{\text{м1}} = 10$  °С:

$$t'_{\text{cp}} = 18 + 10 + 2 \cdot 10^{-2} (280 - 300) - 0,85 (15 - 1) = 15,7 \text{ °С,}$$

при  $t_{\text{б.см.}} = 70$  °С



$$t'_{\text{cp}} = 70 + 10 + 2 \cdot 10^{-2} (280 - 300) - 0,85(15 - 1) = 67,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Если принять величину приращения температуры бетона в изделиях за одни сутки  $\Delta t = 11 \text{ } ^\circ\text{C}$ , то средняя температура бетона при выдерживании в течение 1 суток составит:

$$t'_{\text{cp}} = 15,7 + 0,5 \cdot 11 = 21,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t''_{\text{cp}} = 67,7 + 0,5 \cdot 11 = 73,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При конечной температуре бетона к концу периода тепловой обработки  $\approx 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ , скорости подъема температуры в камере  $V_{\text{п}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C/ч}$  и температуре тепловой обработки  $t_{\text{cp}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$  продолжительность подъема температуры среды  $\tau_{\text{п}}$  в камере составит:

при  $t_{\text{б.см.}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\tau_{\text{п}} = \frac{t_{\text{cp}} + 15 - t'_{\text{cp}}}{V_{\text{п}}} = \frac{100 + 15 - 21,2}{30} = 3,12 \text{ ч},$$

при  $t_{\text{б.см.}} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\tau_{\text{п}} = \frac{100 + 15 - 73,2}{30} = 1,39 \text{ ч}.$$

При других начальных температурах рассчитанные результаты сведены в табл.

Таблица

$t_{\text{б.см.}}$	40	50	60	80	90
$\tau_{\text{п}}$	2,39	2,06	1,72	1,06	0,72

По полученным рассчитанным данным можно построить графическую зависимость  $\tau_{\text{п}} = f(t_{\text{б.см.}})$ , которая представлена на рис. 1.

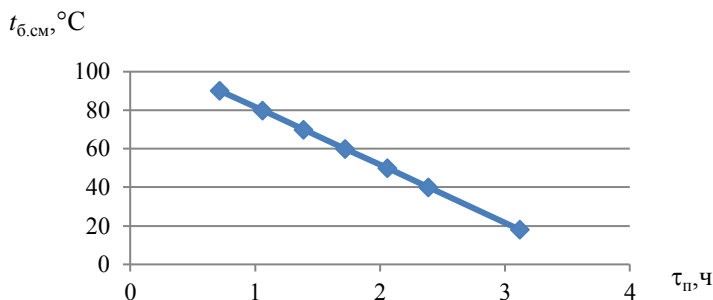


Рис. 1. Зависимость времени подъема температуры изделия от начальной температуры бетонной смеси

Дальнейшее подтверждение вышеуказанных преимуществ можно получить по величине коэффициента полезного использования тепловой энергии, принимая начальные температуры бетонной смеси равные 40 °С и 70 °С.

Используя соответствующие таблицы [1], расход тепловой энергии при разогреве бетона от 40 °С до 80 °С составит  $Q'_6 = 113 - 52 = 61,0$  МДж/м<sup>3</sup>, а при разогреве от 70 °С до 80 °С:  $Q''_6 = 113 - 100 = 13,0$  МДж/м<sup>3</sup>, при разогреве металла от 40 °С до 80 °С расход тепловой энергии составит  $Q'_m = 146 - 54 = 92,0$  МДж/м<sup>3</sup>, а при разогреве от 70 °С до 80 °С:  $Q''_m = 146 - 121 = 25,0$  МДж/м<sup>3</sup>, т.е. полезный расход тепловой энергии от 40 °С до 80 °С:  $Q' = 61 + 92 = 153,0$  МДж/м<sup>3</sup>, а от 70 °С до 80 °С:  $Q'' = 13 + 25 = 38,0$  МДж/м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $K_{t,n}$  вводить не надо, т.к. по таблицам влияние начальных температур учтено в 2-х случаях.

Непроизводительные расходы также определяем по таблицам [1].

1. при разогреве от 40 °С до 80 °С:

$$q'_1 = (19,2 - 16,7) \cdot 0,146 = 0,365 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q'_2 = (15,5 - 10,5) \cdot 0,146 = 0,73 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q'_3 = 15,5 - 10,5 = 5,0 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q'_4 = 7,7 - 5,9 = 1,8 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q'_5 = (18,0 - 7,1) \cdot 0,146 = 1,5 \text{ МДж/м}^2.$$

2. при разогреве от 70 °С до 80 °С:

$$q''_1 = (19,2 - 18,8) \cdot 0,146 = 0,06 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q''_2 = (15,5 - 14) \cdot 0,146 = 0,22 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q''_3 = 15,5 - 14 = 1,5 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q''_4 = 7,7 - 7,1 = 0,6 \text{ МДж/м}^2,$$

$$q''_5 = (18,0 - 15,1) \cdot 0,146 = 0,423 \text{ МДж/м}^2.$$

Рассчитываем суммарные непроизводительные потери для этих двух случаев с коэффициентом  $K_{t,n}$ :

$$K'_{t,n} = \frac{80 - 40}{80 - 15} = 0,61, \quad K''_{t,n} = \frac{80 - 70}{80 - 15} = 0,15$$

и коэффициентом  $K_k$ , учитывающим потери тепла с конденсатом:

$$K'_{k40} = 1,030, \quad K''_{k70} = 1,055.$$

Расчетные значения площадей выбираем из примера при нагреве бетонной смеси от 18 до 80 ° с коэффициентом полезного действия  $\eta = 0,7$ .

$$Q'_{\text{н.п.}_{40-80}} = 0,61(0,365 \cdot 98 + 0,73 \cdot 26 + 5 \cdot 66 + 1,8 \cdot 66 + 1,5 \cdot 49) = 19,38 \text{ кДж};$$

$$Q''_{\text{н.п.}_{70-80}} = 0,15 \cdot (0,06 \cdot 98 + 0,22 \cdot 26 + 1,5 \cdot 66 + 0,6 \cdot 66 + 0,423 \cdot 49) = 1,4 \text{ кДж}.$$

Соответственно коэффициенты полезного использования тепловой энергии составят:

$$\eta' = \frac{153,0}{153,0 + 19,38} = 0,88,$$

$$\eta'' = \frac{38,0}{38,0 + 1,4} = 0,96.$$

По полученным расчетным величинам график зависимости  $\eta = f(t_{\text{нач}})$  будет выглядеть, как показано на рис. 2.

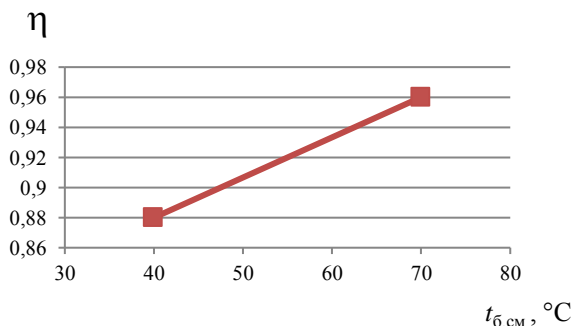


Рис. 2. Зависимость коэффициента полезного использования тепловой энергии от начальной температуры бетонной смеси

Приведенные расчеты и графические зависимости подтверждают преимущества применения предварительно разогретых заполнителей при ТВО железобетонных изделий, как при снижении времени подъема температур, так и по коэффициенту полезного действия.

### Литература

1. ТКП 45-5.03-13-2005 (02250). Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки [Текст]. – Введ. с 01.01.2006. – Минск: Минстройархитектуры, 2006. – 62 с.

**Водоснабжение, водоотведение, очистка  
природных и сточных вод**

## О перспективных направлениях развития предприятия водопроводно-канализационного хозяйства

Аврутин О. А.  
УП «Минскводоканал»  
Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрены направления развития предприятия водопроводно-канализационного хозяйства в современных условиях и актуальные задачи в области водоснабжения водоотведения.*

Основная задача предприятия водопроводно-канализационного хозяйства – бесперебойное обеспечение всей совокупности абонентов и потребителей обслуживаемых населенных пунктов качественными услугами водоснабжения и водоотведения. Следует отметить, что эта задача остается неизменной во времени вне зависимости от внешних обстоятельств.

Статичность главной задачи предприятия ВКХ сохраняется в условиях постоянно изменяющейся внешней среды:

1. *наблюдается постоянная урбанизация населения (рис. 1).* Если в середине прошлого века в Беларуси только 20 процентов населения было городским, а 80 – сельским, то в настоящее время ситуация обратная, около 80 процентов является городским. Динамика увеличения городского населения с уменьшением сельского сохраняется и в настоящее время;



Рис. 1. Статистические данные в распределении городского и сельского населения

*Примечание – Источник: разработка автора на основе материалов Национального статистического комитета Республики Беларусь.*

2. *растет качество жизни населения и вместе с ним – социальный заказ на жизненно важные качественные услуги водоснабжения и водоотведения;*

3. *изменяется состояние окружающей среды, в том числе:*

а. *источников водоснабжения и водных объектов приемников сточных вод;*

Так, в последние 15-20 лет наблюдается тенденция ухудшения качества подземных вод по нитратам, хлоридам, сульфатам, марганцу (рис. 2).

б. *существенно изменяется качество сточных вод, образующихся у абонентов и потребителей.*

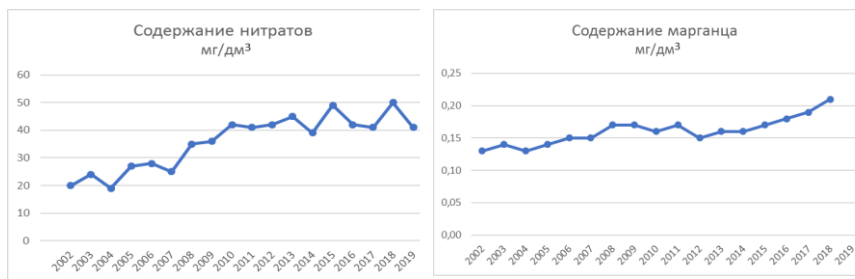


Рис. 2. Динамика изменения качества воды в источниках водоснабжения

Последние 10-15 лет наблюдается тенденция существенного увеличения концентраций загрязняющих веществ в поступающих на городские очистные сооружения сточных водах по ХПК, биогенным элементам (азот, фосфор), другим показателям (рис. 3). Следует отметить, что это увеличение не пропорционально снижению количества сточных вод, образующихся у абонентов в связи с рациональным водопотреблением.

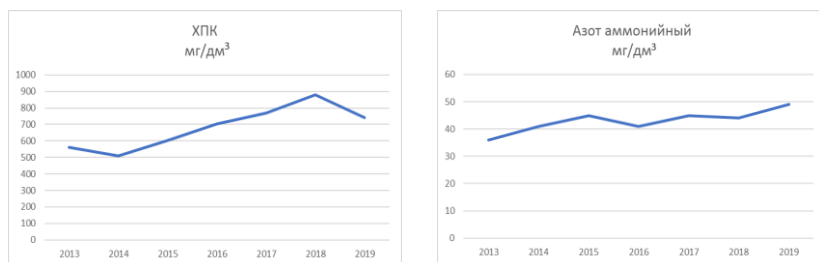


Рис. 3. Динамика изменения качества городских сточных вод

Но самое главное – растёт *общественное* понимание важности устойчивого развития общества, которое в первую очередь предполагает необходимость сохранения состояния окружающей среды для будущих поколений.

Например, что такое для абонента или потребителя качественная услуга водоотведения? Сточные воды должны быть отведены от его объекта или дома! Таков его запрос. И по большому счету, его мало интересует их дальнейшая судьба.

Но общественное понимание этой задачи иное. Если в середине прошлого века пределом мечтаний многих городов мира была механическая очистка сточных вод и удаление органических загрязнений, то спустя 25-30 лет развитые страны начали внедрять технологии удаления биогенных элементов, чтобы предотвратить эвтрофикацию, или зарастание водоёмов, сегодня внедряются технологии извлечения гормонов и антибиотиков, изучается влияние фенолов на репродуктивную функцию рыб в водных объектах.

Сегодня высокий мировой запрос на извлечение в процессе очистки сточных вод энергетических ресурсов, фосфора и других веществ с целью их повторного использования. Так, например, по ориентировочным оценкам энергетический потенциал всего объема сточных вод, поступающих в системы централизованной канализации Республики Беларусь, в переводе на электрическую энергию составляет более 150 млн. кВт ч/год. Кроме этого, безвозвратно на захоронение направляется от 10 до 13 тысяч тонн фосфора. И это на фоне стабильно высокой непокрытой потребности в фосфорных удобрениях сельского хозяйства страны. Необходимость возврата энергии и микроэлементов в большинстве случаев вызвана не экономическими факторами, а требованиями именно устойчивого развития.

При этом важно помнить, что в деятельности водоканала общественная эффективность важна больше, чем экономическая. Но в некотором смысле они должны быть уравновешены.

Все это свидетельствует о том, что при неизменности главной задачи, текущие задачи изменяются весьма динамично, требуют своевременного реагирования на них, внедрения технологий, отвечающих социальным и общественным запросам или опережающих их.

Таким образом, если говорить о перспективных направлениях развития предприятия водопроводно-канализационного хозяйства, то следует остановиться на конкретных организационных и технических задачах с учетом фактического состояния систем водоснабжения и водоотведения. Определяя перспективные направления развития, следует помнить, что у предприятия водопроводно-канализационного хозяйства есть два партнера: потребители и окружающая среда. Деятельность предприятия должна строиться таким образом, чтобы и потребители были удовлетворены, и окружающей среде не наносился урон.

## **Направление 1. СОЗДАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Создание геоинформационных систем следует осуществлять поэтапно (рис. 4).

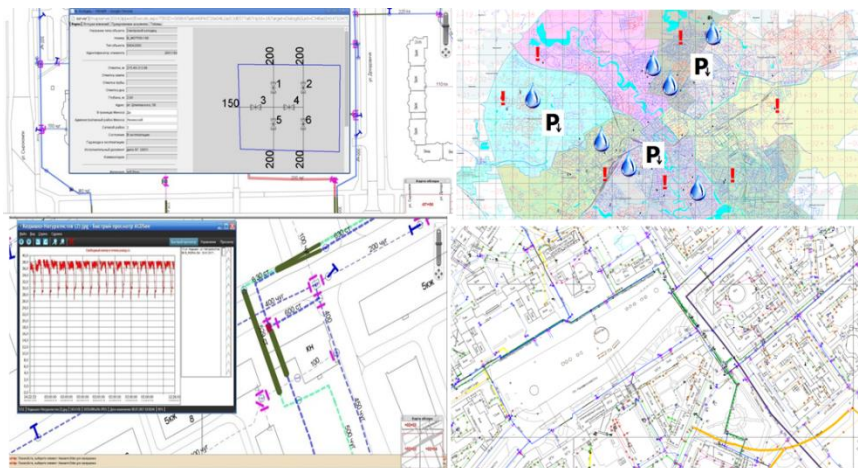


Рис. 4. Создание геоинформационных систем

На первом этапе **Системы водоснабжения и водоотведения должны стать «прозрачными».**

С этой целью необходимо произвести оцифровку текущего состояния систем: пространственное положение сетей, их характеристики (материал, диаметр, год строительства и т.д.); характеристики насосных станций, включая водозаборные скважины, станций водоподготовки и очистных сооружений, электрических сетей. Фактически этот этап можно назвать технической инвентаризацией систем.

Безусловно, эта работа непростая. О многих линейных объектах систем водоснабжения и водоотведения нет вообще никакой информации. Для решения этих задач есть современные инструменты: трассоискатели, GPS геовешки, которые позволяют с высокой точностью определить положение объекта и внести данные о нем в ГИС. Преимуществом современных приборов поиска и определения местоположения объекта является возможность их использования именно персоналом предприятия ВКХ, без привлечения специализированных организаций.

На втором этапе создания ГИС следует перейти к организации **Цифровизации всех действий с системами.**



Сюда следует отнести различные действия: как плановые, так и аварийные; результаты обследовательских, строительных, диагностических работ; поиск, выявление, устранение скрытых утечек с использованием современных логгерных, или акустических систем; результаты облета беспилотными летательными аппаратами.

Например, облёт магистральных водоводов беспилотными летательными аппаратами может осуществляться на основании координат колодцев, камер, координат поворотов водовода, имеющих в ГИС. Облёт позволяет увидеть полную информацию о состоянии охранных зон, выявлять утечки, несанкционированные постройки и т.д.

Такой комплексный подход к созданию и эксплуатации геоинформационной системы позволяет решить вопросы рациональной организации работ по модернизации сетей и сооружений систем водоснабжения и водоотведения с учетом их фактического состояния.

### ***Направление 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ АКТИВОВ ПРЕДПРИЯТИЯ***

Техническая инвентаризация систем водоснабжения и водоотведения должна выявить необходимые мероприятия, связанные с приведением их в состояние, позволяющее обеспечить предоставление качественных услуг водоснабжения и водоотведения на постоянной, бесперебойной основе.

Под этим понимается необходимость выполнения уже определенных в отрасли задач в части строительства станций обезжелезивания, строительства и реконструкции канализационных очистных сооружений, строительства водопроводных и канализационных сетей.

На этапе модернизации производственных активов следует предусматривать и ***внедрение технологий возврата ресурсов***.

В первую очередь имеется в виду внедрение доступных технологий возврата энергоресурсов при очистке сточных вод, а также фосфора.

### ***Направление 3. ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АКТИВАМИ (СУА)***

В упрощенном варианте можно говорить о внедрении систем планирования и организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Следует признать, что автоматизация работы инженерных служб предприятия ВКХ существенно отстает по сравнению с подразделениями бухгалтерского, финансового и кадрового обеспечения. Фактически это означает, что самая главная – инженерная составляющая работы предприятия ВКХ – остается в ручном управлении, зачастую хаотичном: неуправляемом и бесконтрольном. На многих объектах обслуживание не проводится вовсе, а реализуются только аварийные мероприятия.

Формирование годовых графиков всех видов плановых работ позволит обеспечить стабильно высокое качество предоставляемых услуг, эффек-

тивное использование трудовых ресурсов, а также финансовое планирование для своевременного обслуживания сетей и оборудования с целью их длительной эффективной эксплуатации.

Построение систем управления активами предполагает внедрение современных методов диагностики состояния оборудования, определения запасов работоспособности.

Внедрение систем управления производственными активами должно обеспечить не только плановое обслуживание систем, но и предупреждение возникновения нештатных, аварийных ситуаций.

#### ***Направление 4. ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ***

Основой этой работы должно стать гидравлическое моделирование работы сетей и насосных станций; станций водоподготовки и технологическое моделирование процессов очистки сточных вод (рис. 5).

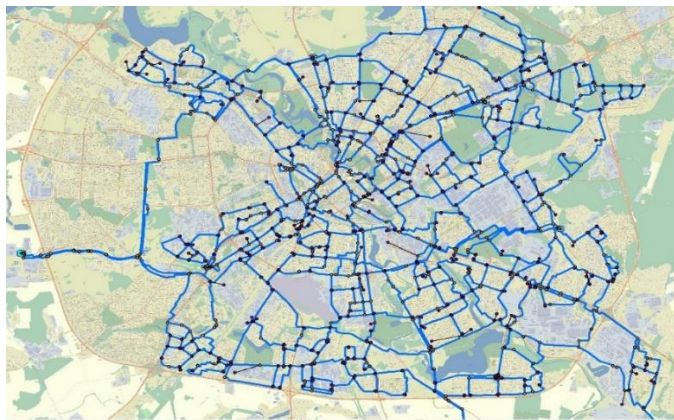


Рис. 5. Гидравлическая модель системы водоснабжения г. Минска

Постоянный анализ работы систем, их моделирование в изменяющихся внешних условиях позволяют оценить адекватность работы систем, поиск системных ошибок (например, закрытых участков) и обеспечить технологически, экологически и экономически наиболее выгодные режимы работы систем.

Так, например, внедрение систем гидравлического расчета для оптимизации работы сетей и сооружений позволяет снизить потери воды, сократить затраты на электроэнергию, выявить участки сетей, требующие замены, перераспределить потоки воды в системе от нескольких насосных

станций, определить гидравлически требуемые параметры их работы при различных режимах работы сети.

При этом построение данной работы следует вести, в том числе, на основании данных on-line мониторинга работы систем: по качеству воды, давлению в системах, удельных расходах электрической энергии (рис. 6).

### ***Направление 5. ТИПИЗАЦИЯ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ И ПОСТОЯННОЙ АКТУАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА (СМК), СУОС И СУОТ***

Как было отмечено выше - основная задача предприятия ВКХ – предоставление **качественных** услуг. Для организации работы и управления процессами на любом предприятии ВКХ имеется множество регламентов, инструкций, распоряжений, приказов. Многообразие локальных нормативных правовых актов приводит к тому, что многие из них просто не работают.

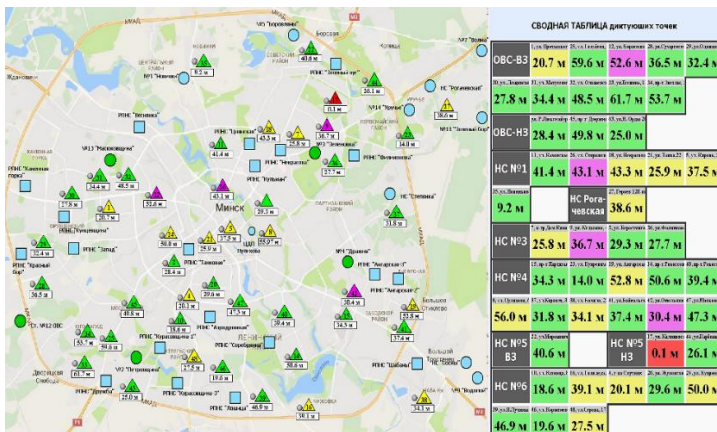


Рис. 6. Программа визуального on-line отслеживания показателей водопроводных сетей г. Минска

В этой связи, представляется необходимым иметь на предприятии единый документ, или свод правил, регламентирующий действия всех служб предприятия водопроводно-канализационного хозяйства. Таким сводом должна быть система менеджмента качества. Корректировка данной системы должна производиться в зависимости от поставленных целей в области качества, задач по их достижению и постоянному анализу фактического результата работы предприятия.

Кроме этого, внедрение и поддержание в актуальном состоянии системы менеджмента качества позволяет результативнее работать с кадрами, в том

числе, обучать вновь принятых работников. Фактически, система должна позволить сохранить знания, что является актуальной проблемой в отрасли.

Аналогичная работа должна вестись по системам управления окружающей средой и охраной труда.

### ***Направление 6. КАДРЫ***

Все, о чем говорилось ранее: «создавать», «внедрять» и «поддерживать» – это действия конкретных людей. Для успешной организации работы по развитию предприятия ВКХ необходимо решение нескольких задач:

Задача №1: люди должны быть мотивированы. Они должны понимать, зачем они это делают? Какой эффект это принесет предприятию? Как будет оценен их вклад в развитие предприятия. Эта задача должна решаться через внедрение системы мотивации персонала КРІ, или ключевых показателей эффективности персонала.

Задача № 2: люди должны быть компетентны – эта задача должна решаться через профессиональную подготовку и переподготовку. При этом под профессиональной переподготовкой зачастую ошибочно понимают обязательные периодические курсы, типа «Ответственных за грузоподъемное оборудование» и т.д. Каждый сотрудник должен обучаться непосредственно своей профессии. Сегодня, когда системы водоснабжения и водоотведения автоматизируются, профессиональная компетенция сотрудников внедряющих компаний растет, а эксплуатирующих падает. Компьютер – снимает показания, анализирует, принимает решения. Инженер водоканала не способен решить простейшую гидравлическую задачу, а зачастую и арифметическую.

Несмотря на высокий уровень автоматизации, диспетчеризации и цифровизации систем ВиК персонал должен уметь понимать состояние систем, анализировать их и в случае необходимости вручную просчитать оптимальный режим и внедрить его.

Повторюсь, росту квалификации персонала будет способствовать и эффективная работа внедренных систем менеджмента качества.

Приведенные перспективные направления развития предприятий водопроводно-канализационного хозяйства не являются исчерпывающими. В тоже время, их внедрение позволит обеспечить бесперебойное предоставление качественных услуг водоснабжения и водоотведения абонентам и потребителям, а также будет способствовать достижению целей устойчивого развития, как в местном, так и региональном масштабе.

**Критерии отнесения технологии очистки сточных вод к наилучшим доступным техническим методам**

Ёдчик А. В., Дубенок С. А.

РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов»

Минск, Республика Беларусь

*Статья посвящена вопросу определения критериев, позволяющих выбрать оптимальную с точки зрения обеспечения экологической безопасности, экономической эффективности и технических возможностей предприятия технологию очистки сточных вод.*

Любое промышленное производство сопровождается образованием производственных сточных вод - сточных вод, которые образуются в технологических процессах в результате производственной деятельности и сбрасываются объектами промышленности в окружающую среду, в том числе через систему канализации.

При этом производственные сточные воды в зависимости от отраслевой специфики производства содержат широкий спектр загрязняющих веществ, как органического, так и минерального происхождения. К основным загрязняющим веществам, содержащимся в большинстве производственных сточных вод, относятся взвешенные вещества, нефтепродукты, ионы тяжёлых металлов, а также органические загрязнения, характеризующиеся показателями БПК и ХПК. Каждая отрасль производства обуславливает также наличие специфических загрязняющих веществ в составе сточных вод.

Учитывая, что, в соответствии с данными статистики, сброс сточных вод в поверхностные водные объекты составляет до 92 % от общего объема сброса сточных вод в окружающую среду, крайне важным видится оптимальный относительно состава сточных вод выбор методов (технологий) очистки производственных сточных вод [1].

Решение задачи выбора среди технологий очистки сточных вод наилучшего доступного технического метода, т. е. обеспечивающего экологическую безопасность при экономической целесообразности и технической возможности его внедрения, следует начать с определения критериев наилучших доступных технических методов очистки сточных вод.

Международный опыт определения наилучших доступных технических методов в целом выделяют ряд следующих общих критериев отнесения технологии к наилучшему доступному техническому методу [2]:

использование малоотходных технологий;

возможность восстановления и рециркуляция веществ, образующихся и используемых в процессе, использования отходов;  
промышленный опыт применения технологии;  
характер, последствия и объем соответствующих выбросов, сбросов, образования отходов;  
расход сырья (в том числе водных ресурсов), используемого в процессе производства, и энергоэффективность.

Наряду с наличием общих критериев наилучших доступных технических методов, для каждого промышленного предприятия, понятие «доступности» метода будет исходить, как видно из определения НДТМ, из «локальных условий». При выборе технологии очистки сточных вод к таким «локальным» условиям можно отнести установленные показатели обеспечения качества сбрасываемых сточных вод, экономические и технические возможности предприятия, а именно:

наличие специфических загрязняющих веществ в составе сточных вод;  
близость и характеристики потенциального приемника сточных вод;  
эффективность работы существующих очистных сооружений на предприятии (при их наличии);

риск загрязнения окружающей среды, обусловленный выбором метода очистки сточных вод;

условия, установленные в разрешении на специальное водопользование, комплексном природоохранном разрешении, решении местных органов власти, и экономические последствия их нарушения;

затраты на очистку сточных вод на территории предприятия в сравнении с затратами на очистку сточных вод за его пределами;

наличие достаточных площадей и технических возможностей для размещения очистных сооружений на территории предприятия;

возможности утилизации отходов, образующихся в процессе очистки сточных вод;

близость территории жилой застройки;

стратегия развития предприятия [3].

По результатам анализа вышеуказанных факторов целесообразно провести эколого-экономический анализ технологий.

К основным экономическим показателям технологии очистки сточных вод можно отнести:

стоимость оборудования, входящего в состав технического метода, включая стоимость основного оборудования, стоимость вспомогательного (запасного) оборудования, аппаратуры и инструментов, а также их доставку;

величина затрат на проектные, строительно-монтажные работы, работы по установке и наладке оборудования, входящего в состав технического метода;

величина затрат на электроэнергию;

количество персонала для обслуживания и эксплуатации оборудования.

К техническим показателям можно отнести: производительность различных типов очистных сооружений сточных вод;

степень очистки и качественные показатели сточных вод на выходе с очистных сооружений и по ступеням очистки;

данные о нормальном и максимальном потреблении и характеристики основных и вспомогательных материалов и реагентов, необходимых для эксплуатации очистных сооружений;

продолжительность работы оборудования до возникновения необходимости технологического обслуживания (чистка, промывка, выгрузка осадка, замена фильтров и т.п.), работы оборудования до замены изнашивающихся деталей, работы оборудования до капитального ремонта, длительность, трудоемкость и периодичность технологического обслуживания, текущего и капитального ремонта.

Поиск наилучших доступных технических методов заключается в нахождении баланса между экономическими затратами на внедрение технического метода и его экологической эффективностью, т.е. измеряемым результатом снижения вредного воздействия на окружающую среду за счет внедрения данных НДТМ.

### Литература

1. Государственный водный кадастр Информационная система [Электронный ресурс]. / Гос. водный кадастр Информ.сист. – 2016 – 2018. – Режим доступа: <http://178.172.161.32:8081/>. – Дата доступа: 29.06.2019.

2. Директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. «О промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним) (новая редакция)». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/70161770/> – Дата доступа: 12.05.2020.

3. Об утверждении методических рекомендаций по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии [Электронный ресурс]: приказ Мин. пром. и торг. РФ, 31 марта 2015, № 665 // Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – Режим доступа: [http://brondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=257&etkstructure\\_id=1872.](http://brondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=257&etkstructure_id=1872.) – Дата доступа: 12.05.2020.

УДК: 504.062.2

**Актуализация картографической и тематической информации  
о поверхностных водных объектах Республики Беларусь**

Баканова Д. С., Громадская Е. И.  
РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного  
использования водных ресурсов»  
Минск, Республика Беларусь

*Основные сведения о гидрологической изученности водных объектов на территории республики относятся к периоду 50-70-х гг. XX века [1]. Вследствие застройки территорий, проведения широкомасштабных мелиоративных работ, влияния изменения климата на водные ресурсы основные гидрологические характеристики претерпели существенные изменения. В статье описаны основные цели и предварительные результаты инвентаризации водных объектов Республики Беларусь, проводимой РУП «ЦНИИКИВР» по заданию Минприроды в период 2017-2020 гг. в разрезе административных областей.*

Рациональное использование природных ресурсов невозможно без актуализации количественных и качественных характеристик современного состояния водных объектов страны.

РУП «ЦНИИКИВР» в период 2017-2020 гг. в рамках Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов на 2016-2020 гг.» (утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 марта 2016 г. № 205) проводит инвентаризацию водных объектов Республики Беларусь в разрезе областей с целью актуализации сведений о количестве, современном состоянии и хозяйственном использовании поверхностных водных объектов на территории республики [2].

В период 2017-2019 гг. РУП «ЦНИИКИВР» проведена инвентаризация водных объектов Брестской, Гомельской, Гродненской, Могилевской областей. Объектами исследования выступили поверхностные водные объекты со следующей детализацией: водотоки с площадью водосбора от 30 км<sup>2</sup>, водоемы с площадью водной глади от 0,5 км<sup>2</sup>, родники.

По результатам инвентаризации в границах 4 областей Беларуси верифицировано и описано 4144 поверхностных водных объекта. Результат разработки ГИС слоев 4144 поверхностных водных объектов представлен на рисунке.

Важным отличием инвентаризации водных объектов, проводимой РУП «ЦНИИКИВР», от предыдущих исследований по данному направлению



является то, что все исследуемые водные объекты идентифицированы на местности с использованием растровой картографической основы масштаба 1:100.000, актуализировано их местоположение при помощи открытых данных Дистанционного зондирования Земли, открытых космических снимков, а так же проведено сопоставление исследуемых водных объектов с доступными результатами инвентаризации мелиоративных систем, так как часть гидрографической сети Беларуси подверглась значительным изменениям из-за проведения мелиоративных работ, канализирования, спрямления русел рек.

С целью визуализации картографической информации (актуального представления) об исследуемых водных объектах, РУП «ЦНИИКИВР» разработаны линейные, полигональные и точечные ГИС слои всех 4144 водных объектов в системе координат WGS84 с точностью масштаба 1:100.000 (рисунк).

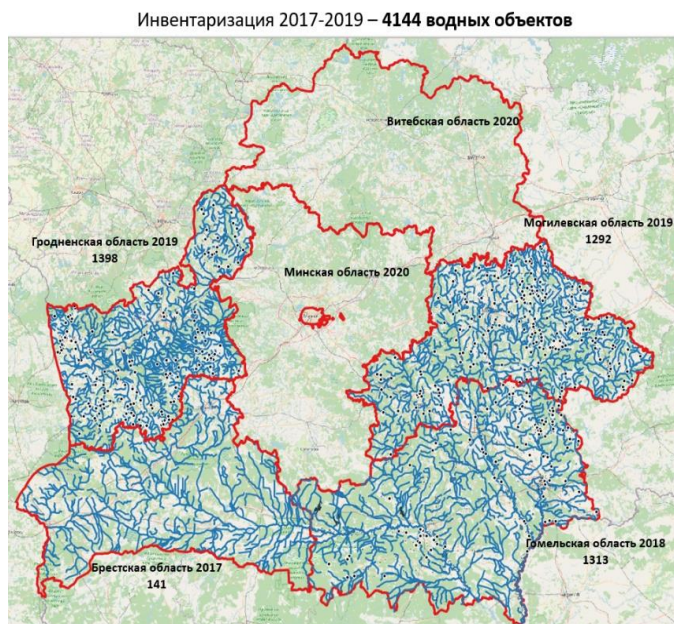


Рис. ГИС слои 4144 водных объектов по результатам инвентаризации 2017-2019 гг.

Актуальная тематическая информации об исследуемых водных объектах занесена в макет «Реестр поверхностных водных объектов Республики Беларусь» информационной системы Государственного водного кадастра,

который содержит набор таблиц по каждой категории инвентаризируемых водных объектов и отражает как общие сведения о водных объектах (наименование, местоположение, географические координаты истока и устья (для водотоков), центра водоема (для озер, водохранилищ, прудов), протяженность, площадь водосбора (для водотоков), так и специальные дополнительные сведения, такие как: границы внутренних водных путей на водных объектах, экологический статус водных объектов, наблюдения на гидрологических постах, описание гидрометеорологических условий, целей пользования водными объектами (аренда, зоны отдыха).

Картографическая (ГИС слой) и соответствующая тематическая (заполненный макет Реестра) информация о 4144 водных объектах в 4 областях республики занесена в веб раздел «Реестр поверхностных водных объектов Республики Беларусь» информационной системы Государственного водного кадастра. Доступ к имеющейся информации может быть осуществлен путем организации пользовательского запроса на сайте РУП «ЦНИИКИВР» ([cricuwr.by](http://cricuwr.by)) [3].

В 2020 г. РУП «ЦНИИКИВР» завершает первый цикл инвентаризации водных объектов страны инвентаризацией водных объектов Витебской и Минской областей, по результатам которой представит верифицированный перечень, ГИС слои (в системе координат WGS84) и соответствующую актуализированную тематическую информацию об использовании поверхностных водных объектов Республики Беларусь с заявленной детализацией (водотоки с площадью водосбора от 30 км<sup>2</sup>, водоемы с площадью водной глади от 0,5 км<sup>2</sup>, родники).

Инвентаризация водных объектов с представленной детализацией охватывает лишь 20 % от «общепринятого» количества водных объектов Республики Беларусь: большие реки, средние реки и малые реки (протяженностью свыше 10 км); крупные озера, водохранилища, пруды, родники. Оставшиеся 80% водных объектов Республики Беларусь: малые реки (менее 10 км), ручьи (длина менее 5 км), водоемы (площадь водной глади менее 0,5 км<sup>2</sup>). РУП «ЦНИИКИВР» считает необходимым в период 2021-2025 г. провести инвентаризацию поверхностных водных объектов с повышенной детализацией.

### **Литература**

1. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность / Под ред. Н. Д. Шека [и др.]. ; Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР - Ленинград : Гидрометеиздат, 1963-. Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье / Упр. гидрометеорол. службы БССР. – 1963. – 302 с.
2. Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016-2020 гг., утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.03.2016 г.

№ 205 / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 24.03.2016, 5/41827.

3. Официальный сайт РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» [Электронный ресурс] / Республиканское унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов" (ЦНИИКИВР) Минск. – Режим доступа: <http://www.cricuwr.by> – Дата доступа: 12.05.2020.

УДК 628.112

### **Лабораторные исследования эффективности очистки водозаборных скважин методами реверсивной импульсно-реагентной регенерации и «реагентная ванна»**

Амелишко И. Е., Ивашечкин В. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В процессе эксплуатации удельный дебит скважин снижается из-за процессов кольматажа. Для восстановления дебита водозаборных скважин применяются различные методы. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки, поэтому становится актуальной проблема создания эффективных и простых методов регенерации. В БНТУ предложена установка для реверсивной импульсно-реагентной регенерации водозаборных скважин. Были проведены исследования эффективности регенерации методом реверсивной импульсно-реагентной регенерации водозаборных скважин и методом «реагентная ванна».*

Основным сооружением для добычи подземных вод являются водозаборные скважины. В процессе эксплуатации удельный дебит скважин снижается по причине уменьшения проницаемости фильтра и прифилтровой зоны из-за процессов биологического и химического кольматажа. Срок службы скважин редко превышает 18-20 лет, что существенно ниже их расчетного срока эксплуатации [1]. Затраты на увеличение производительности уже существующих скважин меньше затрат на переобустройство скважин и составляют от 5 до 10% от стоимости новой скважины. Для восстановления дебита водозаборных скважин широко применяются различные механические, гидродинамические, импульсные, вибрационные, реагентные и комбинированные методы [2]. Все эти методы регенерации скважин имеют свои преимущества и недостатки, поэтому становится весьма актуальной проблема создания эффективных и простых методов регенерации.

В настоящее время реагентные методы регенерации, являются перспективными для эффективного восстановления структуры, пористости и проницаемости прилегающих к фильтру пород и увеличения срока эксплуатации скважин [3]. В практике эксплуатации скважин часто применяется один из основных реагентных способов регенерации - «реагентная ванна». Метод «реагентная ванна» заключается в том, что в скважину по трубкам заливают реагент, который под влиянием большой плотности и процессов диффузии проникает за контур фильтра и растворяет осадки. Регенерация методом «Реагентная ванна» не всегда обеспечивает полное извлечение кольматирующего осадка из прифильтровой зоны и фильтра скважины из-за неравномерности обработки. Для интенсификации процесса декольматации и повышения эффективности регенерации фильтров в БНТУ предложена установка для реверсивной импульсно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения [4].

Для исследования эффективности регенерации методом реверсивной импульсно-реагентной регенерации водозаборных скважин и методом «реагентная ванна» предложена лабораторная установка, схема которой представлена на рисунке.

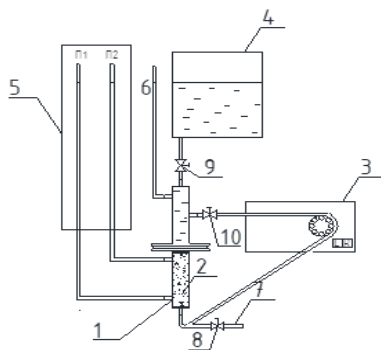


Рис. Схема лабораторной установки:

- 1 – устройство для реагентной обработки, 2 – гравийная загрузка,  
 3 – перистальтический насос, 4 – бак с реагентом, 5 – щит с пьезометрами,  
 6 – трубка для отвода газа, 7 – сбросная трубка, 8, 9, 10 – задвижки

Лабораторная установка состоит из устройства для реверсивной обработки 1, в которое засыпается гравийная загрузка 2. С помощью перистальтического насоса 3 проводится регенерация методом реверсивной

импульсно-реагентной регенерации. При методе «реагентная ванна» перистальтический насос 3 отсоединяется от установки. Реагент поступает из бака 4. По пьезометрам 5 снимаются показания разности напоров.

Методика эксперимента заключалась в определении и сравнении времени очистки и коэффициента фильтрации закольматированной загрузки после регенерации двумя методами: реверсивной импульсно-реагентной регенерации и «реагентная ванна». В качестве реагента использовался раствор кислотное очищающее средство «Дескам» (ТУ РБ 37430824.001-97), содержащий 10 % HCl. Коэффициент фильтрации  $k_f$  чистой загрузки составил 0,26 см/с, закольматированной – 0,01 см/с.

#### *Метод «Реагентная ванна»*

Пробу закольматированной загрузки засыпали в модель устройства 1. Далее из бака 4 реагентом заполняли все устройство. Реагент оставляли в модели устройства 1 на 60 минут, после проводили откачку реагента. После регенерации коэффициент фильтрации закольматированной загрузки составил 0,1 см/с.

#### *Метод реверсивной импульсно-реагентной регенерации*

Пробу закольматированной загрузки засыпали в модель устройства 1. Далее из бака 4 реагентом заполняли устройство. Включали перистальтический насос и прокачивали реагент через закольматированную загрузку в каждом направлении по 60 секунд. Это составляет один цикл очистки. На 13 цикле (через 26 минут) коэффициент фильтрации закольматированной загрузки достиг значения коэффициента фильтрации чистой загрузки и составил 0,26 см/с.

Анализ данных лабораторных исследований показал, что применение метода реверсивной импульсно-реагентной регенерации сокращает время очистки закольматированной загрузки в сравнении с методом «реагентная ванна», а также является значительно более эффективным для регенерации водозаборных скважин.

### **Литература**

1. Цымбалов, А. А. Объяснение физических явлений и процессов декольматации околоскважинной зоны с применением математического моделирования // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. Т. 1. № 7. – Магнитогорск: Издательство МГТУ, 2017. – С. 199–204.
2. Алексеев, В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. – М.: Агропромиздат, 1987. – 239 с.
3. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения/ В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, А. Н. Кондратович: Монография; под ред. В. В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 276 с.

4. Амелишко, И. Е. Реверсивная импульсно-реагентная обработка скважин на воду/ И. Е. Амелишко, В. В. Ивашечкин [и др.] // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: материалы международной конференции, посвященной 145-летию УП «Минскводоканал» / УО «Белорусский государственный технологический университет». – Минск: БГТУ, 2019. – С. 13–16.

УДК 502.5

### **Влияние мелиоративных мероприятий на гидрохимические характеристики малых рек**

Мажайский Ю. А.<sup>1</sup>, Гусева Т. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мещёрский филиал ФГБНУ «Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации РАН им. А. Н. Костякова»,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Рязанский медицинский университет имени И. П. Павлова  
Минздрава России  
Рязань, Россия

*Экологичность и безопасность сельскохозяйственного производства обеспечивает контроль состояния поверхностных водотоков, являющихся связующим звеном всех компонентов агроландшафта. Мелиоративные мероприятия, направленные на повышение почвенного плодородия, зачастую негативно влияют на гидрохимические характеристики водных объектов. Результаты многолетнего мониторинга состояния малой реки в водосборе р. Оки показали, что мелиоративные мероприятия воздействуют на гидрохимический режим водоема, особенно значительно это влияние на содержание в воде таких опасных токсикантов, как тяжелые металлы, что представляет потенциальную экологическую опасность.*

На современном этапе развития биосферы одной из существенных задач экологически безопасного сельскохозяйственного производства является контроль состояния поверхностных водотоков, выступающих в качестве динамичного агента, связывающего все компоненты агроландшафта. Значительное внимание необходимо уделять качественному составу поверхностных и внутрисочвенных вод, так как вода, являясь важнейшим компонентом биосферы в целом, формирует среду обитания человека и является производственным ресурсом, играющим основополагающую роль при решении экологических и социально-экономических проблем [1].

Мелиоративные мероприятия, проводимые на сельскохозяйственных землях, подразумевают комплекс мер, направленных на улучшение полезных характеристик почвы с целью повышения ее плодородия, получения

высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Но, в тоже время, существуют примеры негативного влияния мелиорации на гидрохимические характеристики водных объектов, при этом наибольшую нагрузку испытывают малые реки мелиорируемых ландшафтов [2].

Данные многолетних наблюдений за изменением гидрохимических характеристик основных рек России и их крупных притоков свидетельствуют о тенденции ежегодного ухудшения качества воды. Актуальна эта проблема и для бассейна р. Оки, включающего малые реки и водные объекты общей протяженностью 10255 км. Значительное количество этих водоемов протекает в районах сельскохозяйственного использования земель, являясь компонентом преобразованных мелиорированных ландшафтов, и испытывающих значительную антропогенную нагрузку. Одним из приоритетных загрязнителей гидросферы являются тяжелые металлы (ТМ) [3, 4].

С целью выявления степени влияния мелиораций на гидрохимические характеристики малых рек проведены исследования на крупномасштабной ландшафтной модели – экологическом полигоне. На территории исследуемого ландшафта находится водный объект, непосредственно связанный с водной системой р. Оки. Его основные характеристики: длина – 6,4 км, площадь водосбора – 30,0 км<sup>2</sup>, средняя ширина - 1,0 м, средняя глубина – 0,4 м, максимальный расход воды – 0,3 м<sup>3</sup>/с. Вода водного объекта по ионному составу относится к гидрокарбонатно-кальциевому классу, прозрачная, без цвета и запаха, рН – 6,5, жесткость составляет 1,2 – 2,5 мг-экв/л, количество растворенного O<sub>2</sub> – 6,9 – 7,4 мг/л.

Исследуемый водоем на протяжении значительного промежутка времени испытывает антропогенную нагрузку, в результате функционирования на опытном ландшафте системы орошения, искусственного дренажа, наличия дачных участков, земель частного использования. Водный объект является коллектором, принимающим с ландшафта как поверхностный, так и внутрипочвенный сток, что значительно влияет на гидрохимические характеристики водоема.

Методической основой изучения гидрохимических характеристик малой реки являлось выделение проб воды в условиях их формирования, с последующим определением в пробах рН, растворенного кислорода, жесткости, тяжелых металлов стандартными методами определений (ГОСТ 31861-2012, ГОСТ 31957-2012, ГОСТ 31954-2012, ГОСТ 31859-2012). Определение ТМ в воде проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре ААС-1.

В рамках многолетнего мониторинга, с целью оценки изменения гидрохимических характеристик, проводился отбор проб воды по 3 створам: 1 – исток (ГП-1), 2 – дренажный сток (ГП-2), 3 – место впадения в водную систему р. Оки (ГП-3). Существенных изменений таких гидрохимических

характеристик как рН, жесткость, количество растворенного  $O_2$  за период наблюдений не произошло. Данные многолетнего мониторинга позволяют сделать вывод, что осушительные мелиорации влияют на речной сток, что выражается в увеличении меженного стока при уменьшении расходов в период половодья. При этом происходит сокращение доли поверхностного и повышению доли подземного питания малой реки. Оросительные мелиорации, наличие дачных участков в водосборе малой реки привели к созданию дополнительного стока, содержащего взвешенные вещества, а также техногенные элементы, из которых приоритетными оказались следующие: медь, цинк, свинец, кадмий. Многолетние наблюдения показали, что концентрация Pb и Cd находилось в рамках предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов (0,1 мг/л и 0,005 мг/л, соответственно), а содержание Cu и Zn (ПДК - 0,001 мг/л и 0,01 мг/л, соответственно) в ряде случаев значительно превышало этот показатель. Максимальные концентрации Cu и Zn наблюдались в местах сброса коллекторно-дренажных вод (0,008 мг/л и 0,4 мг/л, соответственно). Содержание Cu, Zn, Pb находилось в пределах ПДК для вод хозяйственно-питьевого назначения, но наблюдалось незначительное превышение данного норматива по Cd, также в районе влияния оросительных мелиоративных мероприятий. Среднее значение концентраций ТМ на замыкающем створе – месте впадения в водную систему р. Оки превышало показания на других створах, что указывает на эффект суммирования загрязнителей и неспособность малого водоема к процессам самоочищения.

Во внутригодовой динамике гидрохимических характеристик существенных колебаний не наблюдалось. В поведении ТМ каких-либо общих закономерностей отмечено не было, для различных элементов проявлялись противоположные тенденции. Анализ информации, полученной нами в ходе исследований, позволил установить, что максимум содержания Cd в воде отмечался в зимний период, минимум – летний. Зависимость концентрации Zn от времени года следующая: наименьшее содержание элемента – февраль–март, максимальная концентрация – январь, май–июнь, ноябрь. В динамике содержания Cu и Pb отмечалась следующая зависимость: наименьшее их концентрация – февраль–март, рост содержания до мая, затем постепенное снижение концентрации в летний период и увеличение содержания элементов в осенне–зимний период с максимумом – в декабре.

Сезонное изменение концентрации ТМ в воде зависело от атмосферных осадков, постепенной седиментации водных взвесей, адсорбирующих ТМ, а также аккумуляции ТМ водной биотой, которая, отмирая осенью, обогащает воду ТМ. Мониторинг позволил выявить, что концентрация ТМ в воде повышалась в зимний период, далее от весны к осени концентрация металлов понижалась, была отмечена связь между содержанием ТМ в воде и



развитием фитопланктона (увеличение численности фитопланктона происходит на фоне уменьшения концентрации ТМ в воде, что происходит в результате поглощения из воды доступных форм ТМ).

Исследования по изучению гидрогеологического режима мелиорируемого ландшафта показали, что поверхностный сток отсутствует. На территории экополигона пробурены скважины для учета уровня и качества грунтовых вод (ГВ). Скважины расположены в наиболее типичных местах ландшафта, перпендикулярно водному объекту. В рамках многолетнего мониторинга отбор проб воды проводился по 4 скважинам, наиболее приближенным к водному объекту и перехватывающим подземный приток с территории ландшафта. Скважина № 1 перехватывает приток ГВ, который попадает непосредственно в водоем, с орошаемых земель, пастбища и пашни, скважина № 2 – с осушаемых земель, скважина № 3 – с дачных участков, скважина № 4 – с лесного массива. Наименьшее содержание ТМ характерно для ГВ, поступающих от лесного массива, наибольшее – для ГВ, формирующихся в районе дачных участков, пашни, пастбища, орошаемых земель. Причем для ГВ, поступающих с дачных участков и орошаемых земель характерно доминирование Zn, Cd, Pb. В ГВ, формирующихся на территориях пашни, пастбища и осушаемых земель, преобладала медь.

Результаты многолетнего мониторинга показали, что мелиоративные мероприятия воздействуют на гидрохимический режим водоема, особенно значительно это влияние на содержание в воде таких опасных токсикантов, как тяжелые металлы, что представляет потенциальную экологическую опасность для Окского бассейна.

### Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году». – М.: НИИ-Природа, 2018. – 298 с.
2. Мажайский, Ю. А. Нейтрализация загрязненных почв / Ю. А. Мажайский. – Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, 2008. – 528 с.
3. Гусева, Т. М. Влияние тяжелых металлов на гидробиологические показатели и микробиом малых рек бассейна реки Оки / Т. М. Гусева // Актуальные вопросы современной науки / Сборник статей по материалам XIX международной научно-практической конференции. – 2019. – Ч. 1. – С. 21–24.
4. Мажайский, Ю. А. Мониторинг тяжёлых металлов в экосистеме малой реки Окского бассейна / Ю. А. Мажайский, Т. М. Гусева // Теоретическая и прикладная экология. – 2017. – №2. – С. 57–62.

**Особенности хозяйственного использования водоохраных территорий Россонского района**

Глинская А. Н., Левачёв Е. В.

РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов»

Минск, Республика Беларусь

*Изменение границ водоохраных зон, в соответствии с действующим Водным кодексом, повлияло на структуру землепользования водоохраных территорий Россонского района. В пределах территории водоохраной зоны и прибрежной полосы г. п. Россоны преобладают природные ландшафты, а земли водоохраных зон межселенных территорий Россонского района характеризуются высоким коэффициентом естественной защиты.*

Согласно действующему Водному кодексу водоохранная зона – это территория, прилегающая к поверхностным водным объектам, на которой устанавливается режим осуществления хозяйственной и иной деятельности, обеспечивающий предотвращение их загрязнения, засорения [1]. Согласно ст. 53, 54 Водного кодекса на территорию под водоохранной зоной накладываются ограничения, которые обуславливают её особенности хозяйственного использования. Непосредственно прилегающая к водному объекту часть водоохранной зоны с более строгими требованиями к ведению хозяйственной деятельности называется прибрежной полосой.

В результате приведения существующих проектов водоохраных зон и прибрежной полосы, в соответствии с требованиями действующего Водного кодекса Республики Беларусь и современными условиями ведения хозяйственной деятельности на прилегающей к водным объектам территории, значительно изменилась структура землепользования водоохраных территорий.

Структура использования земель в водоохраных территориях Россонского района Витебской области показывает, что соотношение природных и антропогенных ландшафтов оптимально. Это позволит в будущем обеспечивать организацию хозяйственной деятельности и рациональное использование природных ресурсов в пределах водоохраных территорий водоемов и водотоков.

Общая структура водохозяйственных территорий населенных пунктов разделяется на три типа:

1. Техногенные территории. К ним относятся промышленные предприятия, строительные организации, базы, склады, объекты инженерно-технической инфраструктуры, внешнего транспорта, гаражи, автостоянки, магистральные улицы, многоквартирная жилая и общественная застройка, нарушенные территории.

2. Техногенно-природные территории. К ним относятся усадебная жилая застройка, кладбища, лечебно-оздоровительные учреждений, спортивные объекты.

3. Природные территории. К ним относятся территории зеленых насаждений общего пользования, водные пространства, лесные насаждения, свободные озелененные природные территории (рис. 1).

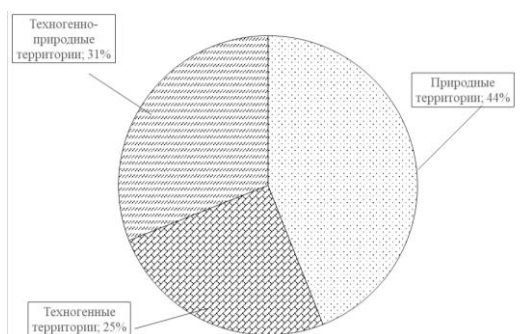


Рис. 1. Структура современного функционального использования водоохраных территорий г. п. Россоны

Чтобы обосновать рациональное хозяйственное использование водоохраных территорий, необходимо установить уровень антропогенной преобразованности территорий при котором сохраняется репродуктивная способность природного комплекса. Антропогенная преобразованность территории оценивается соотношением площадей видов земель, используемых в тех или иных целях. Показатель антропогенной нагрузки зависит от типа угодий.

В пределах территории водоохранной зоны и прибрежной полосы г. п. Россоны преобладают природные ландшафты. На их долю приходится 44,2 % площади водоохранной зоны и 92,24 % площади прибрежной полосы, что создает предпосылки формирования благополучной экологической ситуации в условиях существующей городской застройки. В то же время, наличие производственной, транспортной и жилой застройки несет определенную угрозу загрязнения водных объектов.

Общая структура водохозяйственных территорий разделяется на два типа:

1. Территории, оказывающий негативное воздействие на поверхностные водные объекты: животноводческие фермы и комплексы, механические мастерские и гаражи, склады минеральных удобрений и ядохимикатов, пески, карьеры, свалки мусора и промышленных отходов, дороги, пашни, жилые территории с приусадебными участками, коллективные садоводческие товарищества, летние лагеря скота, скотомогильники и т. д.

2. Территории, выполняющие определенные санирующие и водозащитные функции: водоемы, водотоки, лес, кустарник, луга, пастбища, сенокосы, болота и заболоченные земли (рис. 2).

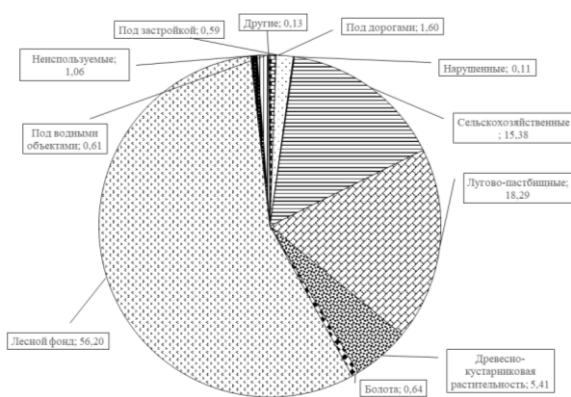


Рис. 2. Структура хозяйственного использования водоохранных зон межселенных территорий Россонского района

Состояние ландшафтов в границах водоохранных территорий и их возможность противостоять антропогенному воздействию оценивается рядом показателей: показатель экологической стабильности, показатель естественной защищенности и показатель антропогенной нагрузки. На основании данных показателей земли, в границах водоохранных территорий, выстроены по степени и характеру воздействия на природный комплекс.

Земли водоохранных территорий межселенных зон Россонского района, после проводимой корректировки проекта водоохранных зон и прибрежных полос, характеризуются высоким коэффициентом естественной защищенности ( $K_{\text{ес.з.}} = 0,96$ ) (таблица), что определяет влияние на состояние земельных угодий водоохранных территорий как близкое к естественному, и соответственно, благоприятно воздействует на природный комплекс.

Оценка экологического соотношения водоохранных зон межселенных территорий Россонского района

Общая площадь водоохранных зон, га	В т.ч.		Оценка естественной защищенности территории	Оценка антропогенной нагрузки	Оценка уровня антропогенной преобразованности территории	Коэффициент экологической стабильности
	природных и мало преобразованных ландшафтов	сильно преобразованных ландшафтов				
70693,32	57365,58 81,15%	13327,74 18,85%	0,96 высокая	1,94 оптимальная	0,19 оптимальный	0,77 высоко-стабильный

Выполненная оценка современного экологического соотношения видов земель в границах водоохранных зон, исследуемого административного района, позволила сделать выводы о том, что откорректированные водоохранные территории обладают высокой степенью естественной защищенности, оптимальным уровнем антропогенной нагрузки и преобразованности территории.

### Литература

1. Водный кодекс Республики Беларусь [Электронный ресурс]: 30 апреля 2014 № 149-З: принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г.: одобрен Советом Респ. 11 апреля 2014 г. //ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. Центр правовой информ. Респ. Беларусь, 2018.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность / Под ред. Н. Д. Шека [и др.]. ; Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР - Ленинград : Гидрометеиздат, 1963-. Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье / Упр. гидрометеорол. службы БССР. – 1963. –302 с.,
3. Разработать каталог водоохранных территорий водных объектов в разрезе административных районов и бассейнов основных рек Республики Беларусь: отчет о НИР(заключ.) / РУП ЦНИИКИВР; рук. Л. Н. Гертман. – Минск, 2017. – 45 с.

**Расчетная оценка вероятности загрязнения подземных вод  
в результате эксплуатации полей фильтрации**

Музыкин В. П., Заяц Ю. И.

РУП «Центральный научно-исследовательский институт  
комплексного использования водных ресурсов»

Минск, Беларусь

*В статье приводятся данные о негативном влиянии действующих полей фильтрации репрезентативных предприятий на подземные воды. Авторами предлагается расчетный параметрический критерий оценки воздействия для прогнозирования воздействия полей фильтрации на подземные воды.*

Очистные сооружения сточных вод с использованием полей фильтрации (далее – ПФ) до настоящего времени являются одним из основных способов биологической очистки сточных вод в естественных условиях.

В РУП «ЦНИИКИВР» выполнены специальные работы по оценке воздействия на подземные воды ПФ коммунальных и промышленных предприятий по репрезентативным объектам, которые показали [1]:

а) воздействие ПФ вызывает на прилегающих территориях в грунтовых водах ореолы загрязнения по следующим компонентам: минерализация (в концентрации до 3,2 ПДК), аммоний-ион (до 63,5 ПДК), нефтепродукты (до 59 ПДК), общее железо (до 136,6 ПДК), марганец (до 71,7 ПДК), СПАВ<sub>анион</sub> (до 1,3 ПДК) и некоторые тяжелые металлы (кадмий и никель до 1,4 ПДК);

б) ореолы загрязнения имеют овальную форму, вытянутую в направлении потока грунтовых вод, удаление границ ореолов загрязнения по изолиниям относительной концентрации  $C/C_{ПДК}=1$  от контуров ПФ составляет от 175 до 575 м; максимальное расстояние рассеивания загрязняющих веществ по потоку подземных вод до значений, соответствующим фоновым значениям показателей загрязнения в грунтовых водах, составляет от 342 до 770 м; величина бокового рассеивания загрязняющих веществ в направлении перпендикулярному потоку подземных вод составляет 200–250 м.

Всё это является следствием системных ошибок, допускаемых на стадии проектирования, в том числе и в связи с недоучетом гидрогеологических условий и прогнозирования. Гидрогеологическое прогнозирование предоставляет возможность избежать необоснованного увеличения площадей ПФ и оценить вероятность формирования ореолов загрязнения уже на стадии проектирования.

Для приближенной прогнозной оценки воздействия ПФ на подземные воды авторами предлагается использовать параметрический критерий воздействия ( $K_n$ ), рассчитываемый по формуле:

$$K_n = P/q, \quad (1)$$

где  $P$  – проектная (фактическая) нагрузка сточных вод на ПФ ( $\text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{га})$ ),  $q_r$  – величина естественных ресурсов (питания) подземных вод, которые должны учитываться в расчетах на участке ПФ в качестве разбавляющего фактора ( $\text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{га})$ ).

Такая способность потока подземных вод в уравнении баланса вещества в расчетном створе потока от участка ПФ выражается следующим равенством:

$$q_t C_t = q_e C_e + q_\phi C_\phi + (q_w C_w - q_n C_n)(x - x_0), \quad (2)$$

где,  $q_t$  и  $C_t$  – удельный расход потока подземных вод и концентрация искомого загрязняющего вещества в нем в расчетном створе ниже ПФ;  $q_e$  и  $C_e$  – удельный расход потока подземных вод и исходная концентрация загрязняющего вещества в нем на участке ПФ;  $q_\phi$  и  $C_\phi$  – удельный расход и исходная концентрация загрязняющего вещества в фильтрующихся сточных водах;  $q_w$  и  $C_w$  – интенсивность инфильтрации атмосферных осадков и исходная концентрация загрязняющего вещества в них;  $q_n$  и  $C_n$  – интенсивность и концентрация загрязняющего вещества, поступающего в нижележащий водоносный горизонт путем перетекания (разгрузки);  $x$  – расстояние до контрольного створа (расчетного сечения) в потоке подземных вод от участка сброса сточных вод;  $x_0$  – начальный створ (сечение) потока подземных вод в выбранной системе координат.

В уравнении (2), соответственно:

$$q_t = q_\phi + [q_e + (q_w - q_n)(x - x_0)], \quad (3)$$

где величина  $q_t = q_e + (q_w - q_n)(x - x_0)$  и есть величина располагаемых ресурсов подземных вод, равных величине их естественных ресурсов, которые следует учитывать в расчетах как разбавляющий фактор.

За многолетний период естественные ресурсы (питание) подземных вод характеризуются значением модуля подземного стока. Для оценки воздействия ПФ достаточно рассматривать первые от поверхности водоносные горизонты, в совокупности находящиеся в области речного дренирования. Тогда для определения  $q_r$  достаточно использовать значение модуля подземного стока в реки ( $M_n$ ), также выраженное в  $\text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{га})$ . Подземный сток в реки для территории республики картирован, имеются соответствующие карты  $M_n$  [2]. Следовательно, расчет параметрического критерия воздействия может быть осуществлен для любых участков ПФ. Чем больше критерий  $K_n$  по величине превышает единицу, тем существеннее воздействие на подземные воды. Если же  $K_n < 1$ , то ореол загрязнения на участке ПФ не

образуется. Соответственно, *параметрический критерий воздействия* может характеризоваться как величина, значение которой являются мерой интенсивности изменения какого-либо процесса от внешнего воздействия, в нашем случае, ресурсов подземных вод от воздействия техногенной инфильтрации.

С целью практического применения параметрического критерия воздействия, выполнена графоаналитическая оценка (рис.) его связи с объемами отведения сточных вод на ПФ ( $Q$ , м<sup>3</sup>/сут). Для чего использованы результаты обобщения статистической отчетности водопользователей по форме 1-вода (Минприроды). Для ПФ рассчитаны параметрические критерии воздействия и построен сводный график их точечного распределения. На рисунке связь выражена средней кривой зависимости критерия  $K_n$  от логарифма объемов отведения сточных вод ( $K_n = f(\lg Q)$ ), имевшихся в 2016 г.

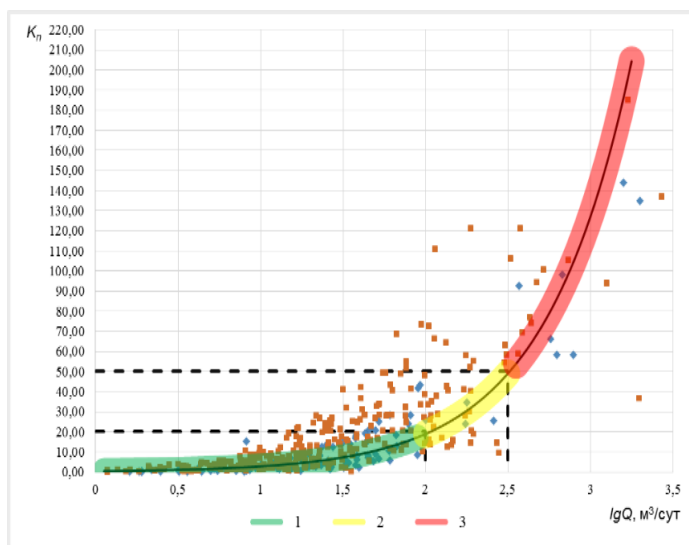


Рис. График зависимости параметрического критерия оценки воздействия от объемов подачи сточных вод на поля фильтрации и расчетные интервалы воздействия полей фильтрации на водные ресурсы:

1 – нейтральное до слабого, 2 – умеренное, 3 – негативное

Используя параметрический критерий воздействия  $K_n$ , можно классифицировать ПФ по степени воздействия следующим образом: 1)  $K_n \leq 20$  - воздействие от нейтрального, до слабого, при котором ореолы загрязнения локализуются непосредственно на участке ПФ; 2)  $20 < K_n < 50$  – умеренное



воздействие, при котором ореолы загрязнения имеют ограниченное распространение на прилегающих территориях; 3)  $K_n \geq 50$  – негативное воздействие, при котором на прилегающих к ПФ территориях формируются значительные по площади ореолы загрязнения. Как показали расчеты, все репрезентативные ПФ относятся к 3 классу негативного воздействия, с  $K_n \geq 50$ .

Из анализа связи  $K_n = f(lgQ)$  вытекает ряд важных следствий.

Во-первых, использование  $K_n$  позволяет осуществить гидрогеологическое прогнозирование воздействия ПФ на стадии проектирования. Рассчитав  $K_n$  и используя приведенные признаки воздействия ПФ, можно получить оценку степени воздействия проектируемых ПФ на подземные воды.

Во-вторых, имея по прогнозу негативную оценку степени воздействия ПФ, необходимо, в соответствии с природоохранными требованиями, предусмотреть мероприятия по предупреждению негативного воздействия на водные объекты. Для вновь проектируемых объектов таким мероприятием должен быть отказ от использования ПФ для очистки сточных вод, если проектируемое сооружение попадает в группу 3. Для эксплуатируемых объектов возможно изменение установившейся практики эксплуатации ПФ. Например, применение на всех ПФ группы 3 очистные сооружения искусственной биологической или физико-химической очистки и использование ПФ только для доочистки сточных вод. Для ПФ промышленных предприятий группы 2 также следует использовать очистные сооружения искусственной очистки с последующей доочисткой на ПФ. Для ПФ группы 1 может применяться текущая схема очистки сточных вод.

Найденное решение позволяет осуществлять гидрогеологическое прогнозирование, на основе минимального количества исходных параметров, которые надежно характеризуют как изучаемый объект, так и связанный с ним участок подземной гидросферы.

### Литература

1. Музыкин, В. П., Мальцева О. А., Валькович А. А., Шепелева Н. М., Ховрин Ю. В. Оценка влияния полей фильтрации населенных пунктов и промышленных предприятий на подземные воды // М-лы 7-й Межд. н.-т. конф. «Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века, 17–18 мая 2007 г. – Мн.: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2007 г. – С. 69–70.
2. Дрозд, В. В. Подземная составляющая речного стока Белоруссии / В. В. Дрозд // Проблемы использования водных ресурсов. – Мн.: Наука и техника, 1971 г. – С. 49–56.

УДК 502.51:006

**Условия формирования различных видов сточных вод, поступающих  
в централизованные системы водоотведения (канализации)  
для их последующей очистки**

Голод Ю. В., Дубенок С. А.

РУП «Центральный научно-исследовательский институт  
комплексного использования водных ресурсов»  
Минск, Республика Беларусь

*В настоящее время отсутствует дифференцированный подход к учету различных видов сточных вод, поступающих на коммунальные очистные сооружения, что влияет на установление допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе сточных вод промышленных предприятий, осуществляющих отведение в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов Республики Беларусь.*

В соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь *сточные воды* – это воды, сбрасываемые от жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после использования их в хозяйственной и иной деятельности, а также воды, образующиеся при выпадении атмосферных осадков, таянии снега, поливке и мытье дорожных покрытий (поливомоечные работы) на территории населенных пунктов, объектов промышленности, строительных площадок и других объектов и сбрасываемые в окружающую среду, в том числе через систему канализации [1].

В соответствии с действующим законодательством Республики Беларусь существует следующая классификация видов сточных вод [2]:

- хозяйственно-бытовые сточные воды;
- производственные сточные воды;
- поверхностные сточные воды;
- городские сточные воды.

Сброс сточных вод в водные объекты осуществляется в соответствии с разрешением на специальное водопользование или комплексным природоохранным разрешением. Учет сточных вод, сбрасываемых в водный объект, должен осуществляться инструментальным методом, посредством приборов учета.

Однако, учет сточных вод, поступающих через централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов в приемную камеру коммунальных очистных сооружений, осуществляется абонентскими службами предприятий водопроводно-канализационного хозяйства (далее – ВКХ), как правило неинструментальным (расчетным) методом.

Предприятия ВКХ осуществляют учет хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод от абонентов в основном по объемам добытой (изъятый) ими воды из собственных источников водоснабжения, полученной воды из систем водоснабжения других предприятий либо по индивидуальным нормативам водопользования. Учет хозяйственно-бытовых сточных вод от потребителей (населения) проводится предприятиями ВКХ по объему полученной ими воды.

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 25.02.2011 № 72 «О некоторых вопросах регулирования цен (тарифов) в Республике Беларусь» [3] тарифы на коммунальные услуги по водоотведению (канализации) регулируются облисполкомами и Минский горисполком и устанавливаются отдельно для юридических лиц (абонентов) и населения (потребителей). В связи с чем, абонентскими службами предприятий ВКХ осуществляется учет хозяйственно-бытовых сточных вод от населения, а также сточных вод от юридических лиц, которые могут включать:

- хозяйственно-бытовые сточные воды предприятий, не имеющих производственные процессы, в которых могут образовываться производственные сточные воды;

- производственные сточные воды;

- смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод;

- поверхностные сточные воды, при отведении поверхностных сточных воды в централизованную систему (водоотведения), поступающих на коммунальные очистные сооружения.

Поведенный анализ фактических данных по объемам водоотведения абонентских служб предприятий ВКХ показал, что ряд предприятий ВКХ ведет учет следующих видов сточных вод, поступающих на коммунальные очистные сооружения:

- хозяйственно-бытовые сточные воды, поступающие на коммунальные очистные сооружения посредством ассенизационного транспорта;

- собственные сточные воды предприятий ВКХ (хозяйственно-бытовые и производственные сточные воды);

- поверхностные сточные воды (при отсутствии централизованных сетей дождевой канализации в населенном пункте);

- дополнительный (неорганизованный) приток (рассчитывается, как разница между общим объемом сточных вод, зафиксированным прибором учета на входе (выходе) коммунальных очистных сооружений, и объемами производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, оплаченными абонентами и потребителями). При этом, как показывает анализ возможных составляющих дополнительного (неорганизованного) притока, он может включать в себя следующие составляющие:

1. Воды от технологических процессов, образующиеся непосредственно на самом предприятии ВКХ (при отсутствии их учета).

2. Поверхностные сточные воды (дождевые и талые) и грунтовые воды, поступающие в сети канализации в связи с несовершенством и конструктивными особенностями коллекторов.

3. Хозяйственно-бытовые сточные воды, неучтенные приборами учета потребителей из-за их нечувствительности к малым расходам воды и из-за ухудшения метрологических характеристик приборов учета в процессе их эксплуатации при водопотреблении [4].

4. Хозяйственно-бытовые сточные воды, неоплаченные потребителями при их самовольном подключении к централизованным сетям водоснабжения и водоотведения (канализации).

5. Хозяйственно-бытовые сточные воды, поступающие на коммунальные очистные сооружения посредством ассенизационного транспорта (при отсутствии их учета).

6. Хозяйственно-бытовые и производственные сточные вод, отводимые абонентами в сети коммунальной канализации ВКХ сверх оплаченных объемов, что обусловлено отсутствием у большей части абонентов ВКХ приборов учета сточных вод.

То есть дополнительный приток, поступающий в централизованные системы водоотведения (канализации) и на коммунальные очистные сооружения, может включать в себя все виды сточных вод (хозяйственно-бытовые, производственные и поверхностные сточные воды).

Дифференцированный подход к учет различных видов сточных вод, поступающих на приемную камеру коммунальных очистных сооружений, значительно влияет на расчет допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод.

С целью недопущения превышения допустимых концентраций, установленных для предприятий ВКХ в разрешении на специальное водопользование или комплексном природоохранном разрешении, на сбросе очищенных сточных вод в водный объект, необходимо проводить расчет допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе производственных и смеси хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, поступающих в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов от промышленных предприятий, с учетом влияния качественных и количественных характеристик поступающих хозяйственно-бытовых и поверхностных сточных вод.

Учитывая действующую классификацию видов сточных вод, при расчете допустимой концентрации загрязняющих веществ в составе производственных и смеси хозяйственно-бытовых и производственных сточных

вод промышленных предприятий, осуществляющих отведение в централизованные системы водоотведения (канализации), необходимо учитывать:

- производственные сточные воды (нормируемых предприятий, производственные сточные воды предприятий ВКХ, смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод предприятий);

- хозяйственно-бытовые сточные воды (абонентов, потребителей, а также доставляемые ассенизационным транспортом, хозяйственно-бытовые сточные воды входящие в состав дополнительного притока);

- поверхностные сточные воды (в составе дополнительного притока).

### **Литература**

1. Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г. № 149-3 (с изменениями от 18 июня 2019 г.)

2. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь № 16 «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод». (с изменениями от 5 сентября 2019 г.)

3. Указ Президента Республики Беларусь № 72 от 25.02.2011 «О некоторых вопросах регулирования цен (тарифов) в Республике Беларусь» (с изменениями от 24 мая 2018 г.)

4. Инструкции по расчету потерь и неучтенных расходов воды из систем водоснабжения населенных пунктов Республики Беларусь, утвержденной постановлением Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь от 31 августа 2005 г. № 43 (с изменениями от 08 июля 2019 г.).

УДК 628.12

### **Анализ режима эксплуатации водопроводных насосных станций для выбора насосного оборудования с целью повышения энергоэффективности**

Гук П. С.

УП «Минскводоканал»

Минск, Республика Беларусь

*Рассматриваются основные параметры, определяющие подбор насосного оборудования для замены на существующих насосных станциях с целью снижения энергопотребления.*

По состоянию на 01.04.2020 г. УП «Минскводоканал» эксплуатирует 424 насосные станции (далее – НС) 3-го и 4-го подъёмов, из них 420

обслуживаются цехом повысительных станций производства «Минскводопровод». Как известно, корректный выбор насосного оборудования определяет энергопотребление объекта, существенно влияет на продолжительность безаварийной работы в течение всего срока эксплуатации. Значительное количество НС запроектировано и построено с учётом обеспечения максимального часового расхода одним насосными агрегатом. Следовательно, предприятие имеет существенный потенциал снижения энергопотребления насосным оборудованием, путем его замены на более эффективные насосные группы, подобранные под фактические режимы работы насосных станций с учетом расчетных пиковых режимов водопотребления.

У каждого насосного агрегата существует рабочая область на напорно-расходной характеристике, в которой КПД высокий и практически постоянный. В случае выхода насоса в процессе работы из рабочей области, его эффективность снижается. Если насос работает с повышенным напором (левее рабочей области), то растет нагрузка на подшипники и уплотнения, что со временем может привести к их преждевременному износу. Если насос работает с повышенным расходом (правее рабочей области), то возрастает риск кавитации.

При подборе насосного оборудования с целью повышения напора в водопроводной сети зачастую руководствуются одной рабочей точкой с максимальным расчётным часовым расходом и расчётным напором, определённым для случая максимального водоразбора при минимальном напоре в подающем трубопроводе. Напор в подающем трубопроводе определяется по его гарантированному значению, указанному в технических условиях, выданных на проектирование хозяйственно-питьевого водопровода.

Однако, учитывая неравномерность водопотребления в жилых зданиях в течение суток, в таком режиме «пиковой» нагрузки насосное оборудование работает лишь несколько часов за сутки.

Зачастую, гарантированный напор в технических условиях указывается в виде диапазона, при этом не всегда минимальное значение указанного напора соответствует случаю минимального водоразбора.

Для корректного подбора насосного оборудования с целью замены на действующей водопроводной насосной станции, помимо определения расчётных параметров по [1], [2], необходимо выполнять инженерные изыскания на объекте.

В частности, необходимо проводить замеры давления в подающем трубопроводе, а также, подачи насосной станции в течение типовых суток.

На основании полученных данных целесообразно определить 24 рабочие точки, т.е. рабочую область.

Рабочие точки для каждого часа суток определяются исходя из имеющихся данных:

1. Давление воды в подающем трубопроводе с учетом его изменения в течение типовых суток, МПа.

2. Заданное давление на выходе с ПНС (в соответствие с суточным графиком), МПа.

3. Средняя подача насосной станцией за рассматриваемый час (при наличии архива данных с расходомеров, смонтированных на НС), м<sup>3</sup>/ч.

Таблица

Расход электроэнергии

Часы суток	Измеренные параметры		Энергопотребление насосной установкой с учётом работы ПЧ, кВтч		
	Напор, развиваемый насосом, м	Подача насоса, м <sup>3</sup> /ч	Wilo Helix V 2203-4/16/E/S/400-50 (2+1)	Grundfos 3xCR 10-6 (2+1)	Lowara G30/10SV05 F022T/SQC (2+1)
0-1	19	1	0.29	0.26	0.28
1-2	18	1	0.28	0.25	0.28
2-3	18	1	0.28	0.25	0.28
3-4	18	2	0.33	0.3	0.34
4-5	18	4	0.45	0.42	0.44
5-6	25	7	0.94	0.86	0.84
6-7	24	6	0.78	0.73	0.71
7-8	31	7	1.14	1.05	1.04
8-9	30	8	1.26	1.15	1.13
9-10	21	9	1.11	0.95	0.93
10-11	21	6	0.69	0.64	0.63
11-12	21	6	0.69	0.64	0.63
12-13	23	4	0.56	0.53	0.52
13-14	23	4	0.56	0.53	0.52
14-15	23	4	0.56	0.53	0.52
15-16	21	3	0.44	0.4	0.4
16-17	21	6	0.69	0.64	0.63
17-18	30	6	0.97	0.9	0.89
18-19	30	9	1.44	1.29	1.27
19-20	30	7	1.1	1.02	1.01
20-21	29	7	1.07	0.98	0.97
21-22	31	7	1.14	1.05	1.04
22-23	24	6	0.78	0.73	0.71
23-24	23	4	0.56	0.53	0.52
Расчетное энергопотребление за сутки, кВтч			18.11	16.63	16.53

В случае отсутствия расходомеров на объекте, среднечасовой расход может быть определён расчётным путём для каждого часа.

В качестве примера можно привести подбор насосного оборудования для замены на действующей водопроводной насосной станции, расположенной по адресу ул. Солтыса 199А в г. Минске.

Проект НС был разработан в 2010 г., объект был введён в эксплуатацию в 2013 г. НС обеспечивает повышение напора водопроводной сети для нужд трёх четырнадцатиэтажных жилых домов. На станции было установлено два насосных агрегата КМ80-50-200 с характеристиками: подача – 50 м<sup>3</sup>/ч, напор – 50 м, номинальная мощность – 15 кВт. Среднесуточное потребление электроэнергии составило 89 кВтч.

В результате проведения аудита режима работы станции, были определены 24 рабочие точки для сравнения расчётного энергопотребления насосными установками различных производителей, подобранных в качестве аналога при модернизации НС.

В табл. приведены расчётные значения потребления электроэнергии насосными установками различных производителей для типовых суток.

Как следует из табл., расчётная экономия электроэнергии составит порядка 71 кВтч в сутки, т.е. 26 тыс. кВтч за год.

Таким образом, корректный подбор насосного оборудования для замены на действующем объекте является ключевым мероприятием как для экономии ТЭР предприятия, так и для надёжной и безаварийной эксплуатации системы.

### Литература

1. «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования»: ТКП 45-4.01-320-2018. (33020) Утверждён и введён в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 67. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 75 с.

УДК 628.16

### **Оценка изменения состава подземных вод при работе скважин с многоуровневыми водоносными горизонтами**

Ющенко В. Д, Велюго Е. С.  
Полоцкий государственный университет  
Новополоцк, Республика Беларусь

*Особенности работы скважин в «сухую» и «дождливую» погоду. Изменение состава подземных вод и их оценка для дальнейшей обработки.*



Республика Беларусь богата подземными водными ресурсами, которые являются основным источником водоснабжения населенных пунктов и объектов различного назначения. При этом решение проблемы улучшения качества водоснабжения особенно в малых населенных пунктах, связано с проведением комплекса мероприятий по строительству или реконструкции скважин и установок водоподготовки.

По результатам обследования текущего состояния систем водоснабжения и качества питьевой воды малых населенных пунктов Витебского региона можно сделать следующие выводы:

- отсутствие должного контроля и учета рабочих параметров работы систем водоснабжения;
- неудовлетворительное техническое состояние наружных водопроводных сетей;
- несовершенное и изношенное оборудование водозаборных и водоочистных комплексов;
- большие потери воды во внутренних водопроводных сетях и водо-разборной арматуре, и нерациональное ее использование.

Если наружные и внутренние водопроводные сети можно промыть и восстановить пропускную способность или заменить наиболее напряженные участки, то работа скважин и установок водоподготовки требует более тщательного анализа и принятия соответствующих решений по их нормальной эксплуатации. Можно считать, что эти элементы являются основными факторами нормальной эксплуатации систем водоснабжения малых населенных пунктов.

Основная проблема качества питьевой воды в Беларуси обусловлена двумя факторами:

- гидрогеохимические особенности формирования водоносных горизонтов, прежде всего присутствие болотной местности и торфяников, которая обуславливает в подземной воде присутствие аммонийного азота и сероводорода;
- техногенное загрязнение, вызванное применением удобрений, а также возможным попаданием неочищенных сточных вод или других органических отходов в поверхностные и подземные воды, что приводит к высокой концентрации нитратов.

Например, производимый мониторинг качества подземной воды в Витебской области показал ряд особенностей.

Коллоидные формы различных загрязнений присутствуют в основном только в первом от поверхности земли водоносном горизонте. В пресных подземных водах преобладают растворенные формы химических элементов. В истинном растворе вещество может находиться в виде простых и

комплексных ионов, а также нейтральных ионных пар и молекул. В то же время могут присутствовать соединения элементов с органическими веществами гумусового ряда, особенно с фульвокислотами, а также полимерные соединения кремнезем.

Для оценки работы скважин применяется фоновая и национальная сеть наблюдений [1,2], которые предназначены для систематического контроля качества подземных вод и уровня водоносных горизонтов, как в свободных, так и напорных водных горизонтах. Это могут быть и водозаборные скважины, расположенные в естественных и слабо нарушенных гидрогеологических условиях. Локальный мониторинг, объектом наблюдения которого являются подземные воды, проводится на пунктах наблюдений, включающих наблюдательные скважины и шахтные колодцы.

Контроль качества подземных вод ведется аттестованными лабораториями различного назначения, причем существующая сеть мониторинга решает следующие задачи:

- изучение особенностей формирования подземных вод, обусловленных природными условиями конкретного региона и своеобразием проявлений техногенных изменений в подземной гидросфере;
- изучения естественного (фоновое) режима подземных вод, являющегося исходным при оценке антропогенной нагрузки;
- трансграничный гидрогеологический мониторинг.

Водоносный горизонт является напорным, если он имеет область питания, расположенную на более высоких отметках, чем водоупорная кровля этого горизонта. В напорном горизонте образуется депрессия пьезометрической поверхности — снижение давления в определенной зоне вокруг скважины.

Напорные воды водозаборных скважин заключены между водонепроницаемыми слоями. В буровой скважине, вскрывшей напорный водоносный горизонт, вода поднимается выше кровли этого горизонта. Если напорный (пьезометрический) уровень расположен выше поверхности земли, то скважина фонтанирует.

Межпластовые напорные воды залегают обычно на более или менее значительной глубине, как правило более 40 м. От поверхности они изолированы водоупорными слоями и поэтому менее подвержены загрязнению, чем воды первого от поверхности земли водоносного горизонта.

Наблюдения за сезонными изменениями уровня подземных вод в безнапорных и частично в напорных водоносных горизонтах выявили следующую сезонную закономерность: уровень воды в шахтных колодцах и скважинах (статический уровень) повышается в весенний и осенне-зимний период, тогда как в летний сезон наблюдается снижение уровня. Хотя сезонный режим в большинстве водоносных горизонтах несколько иной. Кривые изменения уровня воды более плоские (с менее экстремальными

значениями), а весеннее повышение происходит в основном в мае, тогда как падение уровня воды – в ноябре.

Отличительной чертой ряда существующих скважин является использование при заборе воды нескольких водоносных горизонтов, расположенных по высоте слагающих пород. Поэтому решено было проверить их работу в «сухую» и «дождливую» погоду и установить: имеется ли влияние погодных условий на состав воды при эксплуатации таких скважин.

Наблюдения за работой проводились исходя из погодных условий местности водозабора «Заозерье» филиала «Полоцкводоканал» УП «Витебскоблводоканал», а также ряда одиночных скважин других объектов. При этом было принято, что перед отбором проб воды из скважин она должна быть включена в постоянную работу не менее 2-х недель. Дата отбора проб устанавливалась после 4 суток постоянной продолжительности дождя («дождливая погода»), переменной областью с осадками («переходный период с осадками») или периода сухой ясной, может быть пасмурной погодой без осадков («сухая погода»). Под наблюдение попали скважины, в которых забор воды осуществляется с одного водоносного горизонта (одноуровневые скважины), с двух и трех водоносных горизонтов (двухуровневые, трехуровневые соответственно). Скважины подбирались таким образом, чтобы их глубина была примерно одинаковой, порядка 80-100 м, водоносный слой представлял собой пески с включением галечника, нижний слой не менее 16-20 м, последующие по 7-10 м с ограничением по границам водоупорными слоями.

Опыты повторялись по сезонам года. В воде скважин определялись концентрации загрязняющих веществ в аккредитованной лаборатории филиала «Полоцкводоканал» УП «Витебскоблводоканал», а также лаборатории питьевых вод ПГУ по величине pH, общему железу ( $\text{Fe}^0$ , мг/дм<sup>3</sup>), марганцу ( $\text{Mn}^{4+}$ , мг/дм<sup>3</sup>), концентрации аммонийного азота ( $\text{N-NH}_4^+$ , мг/дм<sup>3</sup>) и перманганатной окисляемости (ПО, мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) [3].

Анализ полученных данных показал, что с увеличением количества водоносных слоев в скважине по высоте происходит разбавление в ней инфильтрационными водами, особенно с верхнего горизонта. Это приводит с одной стороны к снижению концентраций железа и марганца до 12-15 % в общем объеме воды из скважины, а с другой увеличение растворенных газов и перманганатной окисляемости на 10-16 % за счет поступления химикатов с сельхоз полей и продуктов органического порядка почвенных грунтов, также может оказывать влияние и заболоченная местность.

Если в воде скважин содержится в повышенной концентрации только железо, то для ее обработки успешно применяется метод упрощенной аэрации с последующим фильтрованием. В качестве загрузки используется кварцевый песок и другие нейтральные загрузки.

Однако при обработке подземной воды сложного состава, когда требуется ее насыщение кислородом воздуха в концентрации 10 мг/дм<sup>3</sup> и более, удаление соединений двухвалентного железа становится невозможно, вследствие того, что весь растворенный в воде кислород может быть израсходован еще в толще загрузки. В результате процессы окисления и задержания железа прекращаются [4].

Тогда для обработки воды сложного состава используются биологический метод или химическое окисление с последующим отстаиванием и фильтрованием. В настоящее время успешно стали применять фильтрование воды со сложными аэрационными устройствами и новыми модифицированными или сорбционными загрузками. Также, при проектировании или реконструкции станций водоподготовки надо предусматривать возможное изменение исходного состава воды в «дождливую» погоду.

### Литература

1. North Belarus Clean Water Sub-Project: Technical Assessment Report. Final report of November 29, 2018.
2. Водные ресурсы Республики Беларусь, их использование и охрана. - Минск: ЦНИИКиВР, 2016. – 24 с.
3. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.01-320-2018. – Введ. 01.10.18 – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018. – 76 с.
4. Ющенко, В. Д. Особенности совместного удаления железа и аммонийного азота из подземных водоисточников в сооружениях напорного типа / В. Д. Ющенко [и др.] // Развитие инженерно-технических методов природообустройства и водопользования: науч. тр. – Калининград, 2018. – С. 98–108.

УДК 504.054

### **Оценка влияния полей фильтрации на подземные воды на примере ОАО «Скидельский сахарный комбинат»**

Денищик А. И., Лободенко П. В., Пашковская Г. О.  
РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов»  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены результаты оценки влияния полей фильтрации на подземные воды. Неэффективная работа полей фильтрации рассматривается на примере одного из предприятий Беларуси. Описаны необходимые меры по выводу из эксплуатации и ликвидации полей фильтрации.*

Объекты хозяйственной и иной деятельности (в том числе поля фильтрации) в процессе своего функционирования могут оказывать вредное воздействие на окружающую среду. Экологическая безопасность должна быть обеспечена путем снижения вредных воздействий на окружающую среду, в том числе за счет планового сокращения площадей полей фильтрации, установленного в Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2025 г.

Поля фильтрации – это очистные сооружения сточных вод, включающие сооружения механической очистки и сооружения естественной биологической очистки путем фильтрации через почвенный слой грунта, устраиваемые в виде спланированных участков земли (карт) с песчаными грунтами, супесями и легкими суглинками, разделенных ограждающими земляными валиками.

В настоящее время в Республике Беларусь в эксплуатации находится около 1590 полей фильтрации с общей площадью 3839 га.

В 2006-2007 гг. и 2017-2019 гг. РУП «ЦНИИКИВР» по заданию Минприроды выполнялись научные исследования влияния полей фильтрации различных категорий для оценки их вредного воздействия на состояние водных ресурсов прилегающих территорий. По результатам проведенных исследований установлено, что в пределах полей фильтрации осуществляется установившаяся техногенная инфильтрация сточных вод, образуя на прилегающих территориях в горизонтах подземных вод специфические ореолы загрязнения.

Исследования по оценке влияния на подземные воды некоторых категорий полей фильтрации позволили сделать следующие выводы:

а) воздействие полей фильтрации вызывает на прилегающих к ним территориях образование в грунтовых водах ореолов загрязнения со следующими приоритетными веществами и показателями: минерализация воды, аммоний-ион, нефтепродукты, железо общее, марганец, СПАВ анионоактивные и некоторые тяжелые металлы;

б) ореолы загрязнения имеют овальную форму, вытянутую в направлении потока грунтовых вод, удаление границ ореолов загрязнения от контуров полей фильтрации составляет от 175 до 575 м;

в) максимальное расстояние рассеивания загрязняющих веществ по потоку подземных вод до значений, соответствующих фоновым значениям показателей загрязнения в грунтовых водах, составляет от 342 до 770 м, величина бокового рассеивания загрязняющих веществ в направлении перпендикулярном потоку подземных вод составляет 200-250 м.

В районах размещения полей фильтрации интенсивность воздействия на подземные воды определяется интенсивностью и распределением подачи

сточных вод по площади карт полей фильтрации, т.е. от фактической гидравлической нагрузки сточных вод. Площадь же ореола загрязнения в первую очередь определяется геолого-гидрогеологическими условиями территории, прилегающей к полям фильтрации.

Локализацию ореолов загрязнения в районе полей фильтрации, т.е. ограничение распространения загрязняющих веществ в подземных водах обеспечивает, прежде всего, разбавление и фильтрационная дисперсия загрязнения в их потоке. Эффект разбавления обуславливается наличием внешних дополнительных резервов в потоках подземных вод – естественных ресурсов, которые служат показателем ежегодного (сезонного) пополнения подземных вод водой с качественным составом, соответствующим качеству атмосферных осадков. Атмосферные осадки на территории Беларуси по своему качеству всегда менее минерализованы, чем подземные воды и повсеместно служат для них в качестве разбавляющего фактора. При фильтрационной дисперсии происходит рассеивание загрязняющих веществ в подземных водах, поскольку загрязняющее вещество в потоке распределяется в большем сечении, чем в начальном.

По результатам исследований РУП «ЦНИИКИВР» составлен перечень полей фильтрации, оказывающих наибольшее негативное воздействие на изменение состояния водных ресурсов, подлежащих выводу из эксплуатации и ликвидации, в котором представлены 55 водопользователей, использовавших в 2016-2018 гг. для отведения сточных вод 61 поле фильтрации. Примером неправильной эксплуатации полей фильтрации, в результате которой происходит загрязнение подземных вод, могут служить поля фильтрации ОАО «Скидельский сахарный комбинат» общей площадью 55 га, включенные в данный перечень.

Содержание и эксплуатация данных полей фильтрации не соответствует их функциональному назначению, так как фактически карты полей фильтрации выполняют роль отстойников-накопителей сточных вод. Достижение предельного состояния для полей фильтрации обусловлено подачей в карты значительных объемов неосветленных или недостаточно осветленных сточных вод, осаждение взвесей которых приводит к снижению фильтрующей способности карт и эффективности использования полей фильтрации как очистных сооружений в целом. Поступление на поля фильтрации производственных сточных вод обеспечивает наличие в иловых отложениях в значительных концентрациях таких химических веществ, как хром – 240-78800 мг/кг, медь – 670-3940 мг/кг, никель – 100-730 мг/кг; цинк – 630-42120 мг/кг; свинец – 83-1140 мг/кг.

Для снижения техногенной нагрузки на подземные воды по результатам проведенных исследований рекомендована замена полей фильтрации ОАО «Скидельский сахарный комбинат» на сооружения полной биологической

очистки сточных вод в искусственных условиях. После принятия управленческих решений о невозможности и (или) нецелесообразности дальнейшего использования полей фильтрации ОАО «Скидельский сахарный комбинат» по проектному назначению, до момента их ликвидации поля фильтрации должны быть приведены в безопасное состояние, исключаящее причинение вреда окружающей среде.

При выводе из эксплуатации полей фильтрации рекомендовано проведение следующих типовых мероприятий:

- оценка степени химического загрязнения земель и подстилающих грунтов в пределах карт полей фильтрации;
- технические мероприятия по обеспечению безопасности окружающей среды.

Оценка степени химического загрязнения земель и подстилающих грунтов проводится в целях предотвращения деградации земель в районах размещения полей фильтрации, разработки и реализации эффективных решений по предотвращению отрицательных экологических последствий при выводе из эксплуатации и ликвидации полей фильтрации, а также восстановления нарушенной природной среды.

Оценка степени химического загрязнения земель и подстилающих грунтов в пределах карт полей фильтрации проводится в плане и в разрезе по каждому загрязняющему веществу с учетом следующих закономерностей:

- опасность химического загрязнения тем выше, чем больше фактическое содержание компонентов загрязнения превышает ПДК;
- опасность химического загрязнения тем выше, чем выше класс опасности химического вещества, его персистентность, растворимость в воде, подвижность и глубина загрязненного слоя;
- опасность химического загрязнения тем выше, чем меньше буферная способность почв, которая зависит от механического состава, содержания органического вещества и кислотности почв.

Технические мероприятия должны включать следующие работы для создания необходимых условий для предотвращения деградации земель, негативного воздействия нарушенных земель на окружающую среду, дальнейшего использования земель по целевому назначению и разрешенному использованию:

- удаление (ликвидацию) ограждающих валиков;
- удаление (выемку) загрязненных иловых отложений (осадков сточных вод);
- удаление (выемку) загрязненных подстилающих грунтов;
- обратную засыпку чистым грунтом;

– формирование и планировку поверхности форм рельефа (сплошную или частичную вертикальную планировку, профилирование, ликвидацию западин, понижений и др.);

– демонтаж (ликвидацию) транспортных и инженерных коммуникаций, необходимость в которых отсутствует с учетом целевого назначения и разрешенного использования земель;

– захоронение загрязненных иловых отложений (осадков сточных вод) и подстилающих грунтов;

– строительство и (или) реконструкцию, восстановление гидротехнических и мелиоративных сооружений, необходимых для поддержания (регулирования) гидрологического режима земель и предотвращения ухудшения их качества;

– химическую мелиорацию земель, формирование потенциально плодородного слоя и окультуривание земель.

После проведения оценки степени загрязнения земель и подстилающих грунтов, а также технических мероприятий по обеспечению экологической безопасности, должна быть проведена рекультивация нарушенных земель, занимаемых полями фильтрации.

Указанные выше мероприятия позволят обеспечить экологическую безопасность при выводе из эксплуатации и последующей ликвидации полей фильтрации ОАО «Скидельский сахарный комбинат».

УДК 502.51:008; 504.6:62/69

### **Водопользование на предприятиях молочной промышленности**

Захарко П. Н., Дубенок С. А.

РУП «Центральный научно-исследовательский институт  
комплексного использования водных ресурсов»

Минск, Республика Беларусь

*Располагая данными о наиболее водоемких статьях водопользования, планируемых объемах переработки молока и производства продукции возможно ежедневно спрогнозировать необходимые объемы водопотребления и объемы образования сточных вод, что особенно актуально при планировании предприятиями организации выпуска сточных вод в водотоки.*

В 2018 году в Республике Беларусь из окружающей среды было добыто (изъято) 1390 млн. м<sup>3</sup> воды, при этом сброшено в окружающую среду 1002 млн. м<sup>3</sup> сточных вод (за исключением поверхностных сточных вод). Около 70 % забранной из окружающей среды воды возвращается обратно в виде сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества. При



этом наибольшее влияние сброс сточных вод оказывает на средние и малые водотоки, гидрологические характеристики которых наиболее уязвимы в условиях изменяющегося климата.

Как показывает практика в последнее десятилетие ряд предприятий пищевой промышленности при строительстве очистных сооружений отказываются от сброса сточных вод в сети канализации и организуют самостоятельный выпуск сточных вод после очистки в поверхностные водные объекты, значительная часть которых является малыми водотоками.

В складывающейся ситуации вопросы водопользования на таких предприятиях становятся все более актуальными.

Согласно Водной стратегии Республики Беларусь на период до 2020 г. [1] основными направлениями деятельности по охране и использованию водных ресурсов являются: охрана водных объектов и подземных вод от загрязнения, устойчивое рациональное водопользование в промышленности и сельском хозяйстве, снижение удельного водопотребления и повышение эффективности использования водноресурсного потенциала.

С целью реализации вышеперечисленных принципов государственной политики предприятия республики, потребляющие водные ресурсы, должны рационально их использовать и не допускать ухудшения качества поверхностных, подземных вод, являющихся приемниками сточных вод предприятий различных отраслей промышленности.

Основной задачей оптимального водопользования является использование экологически чистых технологий, которые обеспечат выпуск продукции с минимальным вредным воздействием на окружающую среду за счет уменьшения сброса сточных вод, сокращения количества загрязняющих веществ в сточных водах, выбросах и твердых отходах, а также экономии воды и энергоресурсов. Оптимальное водопользование в конечном счете должно привести к созданию замкнутых систем водопользования, функционирование которых обеспечивает очистку локальных потоков сточных вод, поэтапное увеличение удельной доли повторно-последовательного и оборотного водоснабжения на предприятии и минимизации отведения сточных вод за пределы предприятия.

На предприятиях молочной промышленности приведенные принципы оптимизации водопользования внедряются сложнее за счет специфики технологических процессов, а также наличия ряда ограничений со стороны органов санитарно-эпидемиологического надзора к повторному использованию воды в пищевой промышленности.

Водопользование на предприятиях молочной промышленности имеет ряд особенностей:

- использование большого объема свежей питьевой воды для санитарной обработки оборудования и образование при этом значительного объема сточных вод, загрязненных органическими веществами;

- образование побочных продуктов переработки молока – сыворотка, которую необходимо включать в технологический процесс с целью ее переработки; испаренная влага (выпар) в вакуум-выпарных установках; пермеат, образующийся при эксплуатации установок обратного осмоса, нанофильтрации и др.;

- использование большого объема жидких моющих средств (кислоты, щелочи, дезинфицирующие средства), увеличивающих объем сточных вод в процессе мойки оборудования;

- часовая неравномерность использования воды и образования сточных вод.

Так, если ранее предприятия молочной промышленности в основном специализировались на выпуске 2-5 видов молочной продукции, и водопользование в целом было более стабильным в течение смены, то в настоящее время одно предприятие может выпускать до 20 видов продукции за смену, что требует более частых санитарных обработок оборудования и приводит к неравномерному водопользованию в течение смены.

В условиях неравномерности водопотребления и водоотведения важно понимать какое оборудование или какой технологический процесс требует наибольший объем воды или является источником образования наибольшего объема сточных вод.

Проведенный анализ водопользования на предприятиях молочной промышленности, позволил выделить наиболее водоемкие технологические процессы:

- 1) санитарная обработка оборудования;
- 2) наружная и внутренняя мойка автомолцистерн, доставляющих сырье на предприятие;
- 3) выработка тепла в котельной и эксплуатация оборотных систем водоснабжения;
- 4) обеспечение технологических параметров работы оборудования.

Первая статья расхода воды, санитарная обработка оборудования, в среднем составляет 40-70 % от общего водопотребления. Снижение объемов водопотребления и, соответственно, водоотведения, по данной статье возможно за счет:

- организации безразборных моек (СИП-мойки), включающих циркуляцию моющих средств, на основных технологических процессах производства;

- совершенствования конструктивных особенностей оборудования, позволяющих уменьшить использование моющих средств для вымывания остатков продуктов;

- использования многофункциональных моющих средств, обладающих одновременно моющими и дезинфицирующими свойствами.

Вторая статья расхода воды, наружная и внутренняя мойка автомолцистерн, в среднем составляет около 15 % от общего водопотребления. Снижение водопотребления и, соответственно водоотведения, по данной статье возможно за счет использования воды после последнего этапа внутренней мойки для наружного обмыва автомолцистерн.

Третья статья расхода воды, выработка тепла в котельной и эксплуатация оборотных систем водоснабжения, зависит прежде всего от организованной системы возврата конденсата. Чаще всего на предприятиях молочной промышленности возврат конденсата составляет не более 40 %, что и обуславливает высокое водопотребление в котельной. Снизить объемы водопотребления свежей воды при эксплуатации оборотных систем возможно, например, за счет использования конденсата вакуум-выпарных установок для подпитки систем оборотного водоснабжения.

Четвертая статья расхода воды, использование воды для обеспечения технологических параметров работы оборудования, зависит от количества оборудования, охлаждаемого по прямоточной схеме. Практика работы с предприятиями молочной промышленности показала, что чаще всего по прямоточной схеме охлаждаются следующие виды оборудования: гомогенизаторы, пастеризаторы, заквасочники и др. Уменьшение объема воды по данной статье возможно только за счет перехода на оборотное водоснабжение.

Таким образом, располагая данными о наиболее водоемких статьях водопользования, планируемых объемах переработки молока, видах и объемах производства продукции возможно ежедневно спрогнозировать необходимые объемы водопотребления и объемы образования сточных вод. При этом прогнозирование водопользования играет важную роль при планировании предприятиями сброса сточных вод в малые водотоки, расход которых в летний период может достигать критических значений. Отсутствие у предприятий возможности оперативного изменения режимов водопользования в условиях изменяющегося климата может привести к постепенному истощению водных ресурсов и загрязнению водных объектов.

### **Литература**

1. Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2020 г., утверждена решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, от 11 августа 2011 г., № 72–Р.

УДК 628.1.032.

## **Исследование влияния загрязнителей на природные воды**

Абдурахманов Х. И., Агзамова Я. С., Арипов А. Х., Мусаев М. Н.  
Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова  
Ташкент, Республика Узбекистан

*По результатам исследований выявлены основные загрязнители подземных вод и их влияние на здоровье населения. Эксперименты проводились в долине Чирчик из разных скважин подземных вод и изучен их химический состав. Исследования показали, что вниз по долине качество подземных вод значительно ухудшается, что не позволяет использовать воду для хозяйственных и питьевых целей, поэтому вода используется предприятиями, в основном, в технических процессах производства.*

Вода – фундаментальный ресурс для производства продовольствия, охраны здоровья, достойной жизни и развития человечества. Мировые ресурсы пресной воды находятся под нарастающим прессом. Проблема дефицита воды стала серьезным глобальным взрывом и привела к ухудшению природной среды, снижению средств к существованию и росту заболеваемости населения. Сегодня нехватку питьевой воды испытывают свыше 2 миллиардов человек в более чем 40 странах. Дефицит водных ресурсов является одним из главных ограничивающих факторов для будущего развития Узбекистана. Уже сегодня страна сталкивается с проблемами, связанными с недостатком воды, загрязнением и истощением водных источников.

Исходя из этого, целесообразно детальное изучение определенных районов республики по состоянию качества и обеспеченности водными ресурсами, в частности подземными водами.

Данная работа посвящена оценке по исследованию влияния загрязнителей на природные воды долины Чирчик, Ташкентской области республики Узбекистан [1].

Результаты на рисунке показывают, высокое промышленное и сельскохозяйственное освоение территорий, развиваются процессы технологического процесса, как их следствие, большинство подземных вод загрязняются ингредиентами, такими как нефтепродукты, хром ионы, а также молекулы фенола, в результате чего подземные воды подвергались качественному и количественному изменению. Нефтепродукты оказывают негативное воздействие на водные экосистемы: для гибели большинства речных рыб достаточно концентрации нефтепродуктов 0,01 мг на 1 л пресной воды.

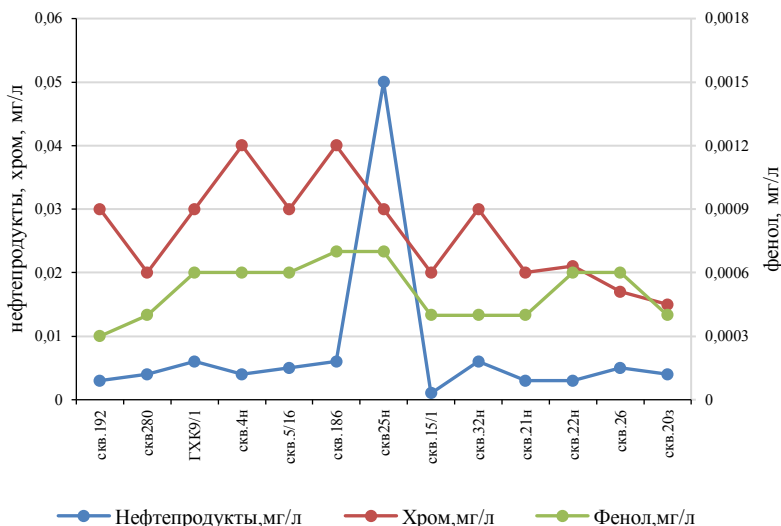


Рис. Результаты химического анализа подземных вод долины Чирчик

Из-за особого значения поверхностного слоя гидросферы в производстве водной флоры и фауны загрязнение воды нефтью и нефтепродуктами наносит ущерб, превышающий другие виды воздействия на природу, образуя плёнку, они снижают доступ кислорода к поверхности воды, уменьшая испарение с её поверхности на 60 % [2].

По результатам исследований можно сделать следующие выводы, так как от качества подземных вод, которые являются основным источником питьевого водоснабжения, непосредственно зависит здоровье населения, а от качества вод в целом – и состояние экосистем, в управлении их качеством должны быть вовлечены органы здравоохранения и охраны природы.

### Литература

1. Агзамова, Я. С. Современные экологические состояние водных ресурсов г. Чирчика / Я. С. Агзамова, Л. С. Рахимова // Матер. I Респ. научн.-техн. конф. – Ташкент, 2017. – С.142–145.
2. Виноградова, М. Г. Влияние нефти и нефтепродуктов на состояние воды в г. Твери и Тверской области / М. Г. Виноградова, Е. В. Шайкин // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 12. – С. 83–84.

## Очистка сточных вод макропористым катионитом

Турабджанов С. М., Шохакимова А. А.,  
Понамарёва Т. В., Рахимова Л. С.

Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова  
Ташкент, Республика Узбекистан

*В данной научной работе получен ионит макропористой структуры с целью очистки промышленных сточных вод от загрязнителей макромолекулярного строения. Экспериментальные данные показали, что полученный макропористый ионит имеет суммарный объем пор в 160 раз больше, чем ионит гелевой структуры. Для изучения зависимости свойств ионита от степени сшивки и количества порообразователя были получены сополимеры, в которых мольное соотношение фурфурола варьировалось в пределах от 1 до 2 молей на 1 моль ДФО, количество порообразователя изменялось от 20 до 60 % от общего веса мономеров.*

С момента открытия ионного обмена прошло уже более 130 лет, однако интерес к этому явлению не ослабевает, а наоборот, закономерно возрастает, все глубже осознается его значение в процессе очистки сточных вод от загрязнителей органического происхождения. Ионный обмен применяется в научных исследованиях, в химическом анализе, во многих отраслях современной техники, в сельском хозяйстве, в медицине, в пищевой и других отраслях промышленности [1]. Несмотря на большой ассортимент промышленных марок ионитов, многие из них обладают рядом недостатков, которые ограничивают возможности и сферы их применения. Поэтому остается актуальной проблема создания новых ионообменных полимеров макропористой структуры с улучшенными физико-химическими свойствами на основе доступного местного сырья [2].

Наличие макропор в ионите позволяет ему поглощать алифатические и циклические соединения, что недоступно обычным сополимерам. Этим же объясняется повышенная механическая прочность ионитов на основе макропористых сополимеров в условиях эксплуатации, так как при сорбции и десорбции их объем остается почти постоянным. Макропористость создает большую поверхность обмена, способствует быстрой диффузии ионов и сорбции молекул большого размера. Учитывая вышесказанное, поликонденсацией дифенилоксида и фурфурола в присутствии различных порообразователей (н-гептана и камфары), были получены сополимеры макропористой структуры.

Основные характеристики пористости макропористого ионообменника такие, как суммарный объем пор (в  $\text{см}^3/\text{г}$ ), средний эффективный радиус пор, распределение пор по их радиусам, удельная поверхность (в  $\text{м}^2/\text{г}$ ), изучены на высоковакуумной установке со ртутным затвором и кварцевыми весами Мак-Бена в интервале относительных влажностей 0 – 100 % при  $25 \pm 0,3$  °С. Результаты приведены в таблице.

Таблица

Влияние природы порообразователя на капиллярно-пористую структуру образцов

Показатели	Ед.изм.	Порообразователь	
		н-гептан	кам-фара
Ёмкость монослоя	$X_m$ , г/г	0,0325	0,0420
Удельная поверхность, $S_{уд}$	$\text{м}^2/\text{г}$	114,24	147,63
Суммарный объем пор, $W_0$	$\text{см}^3/\text{г}$	0,17	0,25
Радиус субмикроскопических капилляров, $r_k$	Å	29,76	33,87

В производимых промышленностью макропористых ионитов суммарный объем пор составляет 0,2-1,0  $\text{см}^3/\text{г}$ , удельная поверхность от 30 до 200  $\text{м}^2/\text{г}$ , преимущественный радиус пор составляет 5 – 60 нм. Полученными нами данные по сравнению производственных ионитов не уступает своими показателями и показывает преимущественную характеристику.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны условия получения сульфокислотных катионитов и определена зависимость их свойств от степени макропористости. Благодаря продолжительные обменные реакции и большую скорость фильтрации из-за наличия макропор ионит обладает сорбционной способностью к загрязнителям, присутствующим в воде.

### Литература

1. Turabdzhzhanov, S. New approach to the synthesis of polycondensation ion-exchange polymers / S. Turabdzhzhanov, B. Kedelbaev, and co-authors. // News of the National Academy of Science of the Republic of Kazakhstan. Geology and technical sciences. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.56> .
2. Turabdzhzhanov, S. M. Perspective Wastewater Treatment from  $\text{Cu}^{2+}$  Ions in the Mining Industry / S. M. Turabdzhzhanov // IV th International Innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences 105, 02025 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502025>.

**Особенности проектирования реагентного хозяйства по дозированию флокулянтов**Ануфриев В. Н.<sup>1</sup>, Волкова Г. А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь,<sup>2</sup>Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь

*Рассмотрены принципы расчета и организации реагентного хозяйства для приготовления и дозирования флокулянтов.*

Одним из способов интенсификации осветления воды и кондиционирования осадков и шламов является использование высокомолекулярных органических флокулянтов. Расчёт и проектирование реагентного хозяйства для приготовления флокулянта и его дозирования регламентируется требованиями СН 4.01.01-2019 [1], которые устанавливают необходимость проведения инженерных изысканий и лабораторных испытаний.

Высокие молекулярные массы флокулянтов (от 300 тыс. до 20 млн.) и структура их молекул, представляющих длинные полимеризованные соединения с различной степенью разветвленности, определяют необходимость создания специальных условий растворения и приготовления рабочих растворов. Особенностью приготовления рабочих растворов флокулянтов в отличие от других реагентов является наличие фазы созревания, в процессе которой происходит трансформация структуры молекул флокулянта при разбавлении их концентрированных растворов. Концентрация рабочих растворов флокулянтов зависит от их молекулярной массы и составляет от 0,05 % до 0,5 %. Продолжительность фазы созревания флокулянта, определяемая как время от момента его полного растворения до момента его готовности к дозированию, указывается производителем реагента. При отсутствии таких данных, продолжительность процесса созревания флокулянта следует принимать не менее 30 мин. Таким образом, при приготовлении рабочих растворов флокулянтов требуется выделение для процесса созревания отдельной технологической емкости или учета продолжительности созревания при применении традиционных расходных баков.

Растворение флокулянтов должно осуществляться при интенсивном перемешивании в аппаратах с мешалками.

Производительность установки для приготовления раствора флокулянта  $q_{\text{меш}}$ , кг/ч, определяется по формуле:

$$q_{\text{меш}} = \frac{Q_{\text{сут}} \cdot D_{\text{фл}}}{t_{\text{фл}}}, \quad (1)$$



где  $Q_{\text{сут}}$  – производительность станции водоподготовки, м<sup>3</sup>/сут;  $D_{\text{фл}}$  – доза флокулянта, г/дм<sup>3</sup>;  $t_{\text{фл}}$  – продолжительность работы станции водоподготовки в течение суток, ч.

Объем расходных баков флокулянта следует определять с учетом продолжительности созревания флокулянта и сроком пригодности раствора флокулянта после его созревания для дозирования. Срок пригодности раствора флокулянта после его созревания для дозирования декларируется производителем флокулянта, а при отсутствии указанных данных, срок пригодности раствора флокулянта следует принимать не более 4 ч.

Объем расходных баков флокулянта,  $W_{\text{расх.фл}}$  (м<sup>3</sup>) определяется по формуле:

$$W_{\text{расх.фл}} = \frac{Q_{\text{ч}} \cdot D_{\text{фл}} \cdot T_{\text{фл}} \cdot 100}{b_{\text{фл расх}} \cdot \rho_{\text{фл расх}}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ч}}$  – производительность станции водоподготовки, м<sup>3</sup>/ч;  $D_{\text{фл}}$  – доза флокулянта, г/дм<sup>3</sup>;  $T_{\text{фл}}$  – продолжительность пребывания раствора флокулянта в расходном баке, ч;  $b_{\text{фл расх}}$  – концентрация раствора флокулянта в расходном баке, ‰;  $\rho_{\text{фл расх}}$  – плотность раствора флокулянта в расходном баке, кг/м<sup>3</sup>.

Объем растворного бака флокулянта  $W_{\text{раст.фл}}$  (м<sup>3</sup>), определяется по формуле:

$$W_{\text{раст.фл}} = W_{\text{расх.фл}} \frac{b_{\text{фл расх}}}{b_{\text{фл}}}, \quad (3)$$

где  $b_{\text{фл}}$  – концентрация раствора флокулянта в растворном баке, ‰;  $b_{\text{фл расх}}$  – концентрация раствора флокулянта в расходном баке, ‰;  $W_{\text{расх.фл}}$  – объем расходных баков флокулянта, м<sup>3</sup>.

В настоящее время все большее распространение получают серийные конструкции станций приготовления раствора флокулянта. Комплектные станции заводского изготовления производятся трехкамерные (проточного типа) и двухкамерные (периодического действия). Трехкамерные станции включают три камеры: растворный бак, камера для созревания флокулянта, расходный бак. Раствор флокулянта готовится в растворном баке и последовательно подается в камеру созревания и далее в расходный бак, из которого производится дозирование раствора в обрабатываемую воду [2] (рис. 1)

Двухкамерные станции (периодического действия), как правило, включают растворный бак и два расходных бака для созревания и дозирования раствора флокулянта. Подача и дозирование раствора флокулянта из двух расходных баков производятся периодическим переключением дозирования, после опорожнения одного бака, на другой (рис. 2).

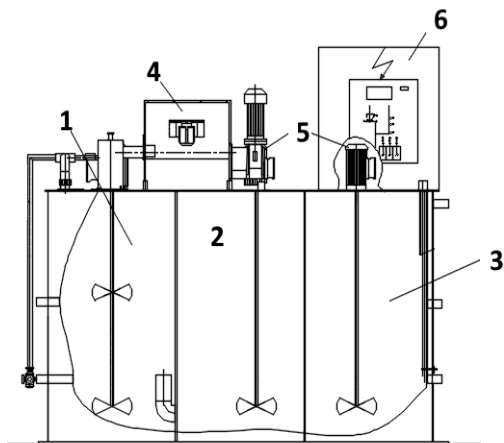


Рис. 1. Трёхкамерная станция заводского изготовления для приготовления раствора флокулянта [3]:  
 1 – растворный бак, 2 – камера созревания флокулянта, 3 – расходный бак,  
 4 – устройство подачи сыпучего или жидкого реагента, 5 – мешалки,  
 6 – блок управления

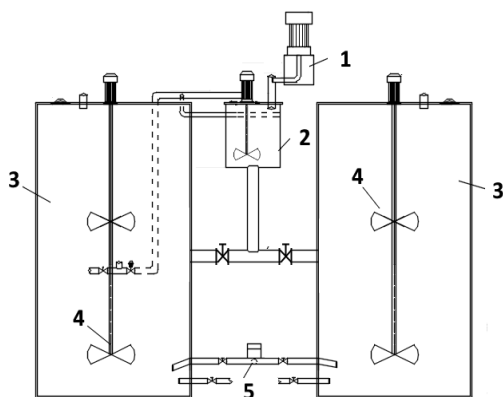


Рис. 2. Двухкамерная станция заводского изготовления для приготовления раствора флокулянта:  
 1 – загрузочное устройство флокулянта, 2 – растворный бак, 3 – расходный бак,  
 4 – мешалка с электродвигателем, 5 – дозатор

Выбор типа станции должен основываться на оценке режима дозирования и производительности установки. Использование трехкамерных установок обосновано в случае равномерного режима дозирования, при котором не происходит существенных изменений расходов в течение относительно короткого времени, что может быть связано с изменениями расхода и качества обрабатываемой воды.

При использовании двухкамерных установок обеспечивается более стабильный режим подачи созревшего флокулянта из попарно переключающихся расходных баков. В данном случае исключается подача незрелого флокулянта в обрабатываемую воду.

### Литература

1. «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования»: ТКП 45-4.01-320-2018. (33020) Утверждён и введён в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 67. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 75 с.

2. Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 622-2 (A). Dosieranlagen für Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel; Teil 2: Flockungshilfsmittel, 2017, 18 S.

3. Установки приготовления и дозирования растворов. [Электронный ресурс] / Промхимтех Установки приготовления и дозирования растворов, М. – Режим доступа: <https://promhimtech.ru/produksiya/vodoochistka-i-dezinfektsiya-vodyi/ustanovki-prigotovleniya-i-dozirovaniya-rastvorov/>. – Дата доступа: 25.04.2020.

УДК 628.32

### **Обработка возвратных иловых вод от сооружений по обезвоживанию осадка**

Ануфриев В. Н.<sup>1</sup>, Волкова Г. А.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь

*Рассмотрены возможные решения по управлению возвратными потоками иловой воды от станций обезвоживания анаэробно стабилизированного осадка, таких как дозирование иловой воды без обработки в поток сточных вод перед сооружениями биологической очистки, дозирование иловой воды*

*после ее обработки с удалением аммонийного азота отдувкой или биологическим окислением.*

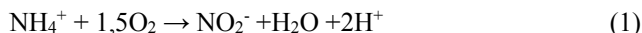
В настоящее время строительство и реконструкция очистных сооружений сточных вод крупных населенных пунктов производится с использованием технологии анаэробной стабилизации осадка в метантенках, что обеспечивает уменьшение его объема и получение биогаза, используемого для производства электроэнергии. Вместе с тем, при анаэробных процессах сбраживания осадка происходит восстановление нитратных форм азота с получением аммония. Таким образом в фугате или других видах иловой воды, образующейся при механическом обезвоживании сброженного осадка содержатся значительные количества аммонийных соединений азота, поступают на сооружения биологической очистки, существенно увеличивая нагрузку по азоту. Кроме того, окисление аммонийного азота увеличивает потребность в кислороде и соответственно повышает расход воздуха, подаваемый системами аэрации. Как известно для биологического окисления 1 кг аммонийного азота требуется 4,3 кг кислорода, что в четыре раза превышает удельный расход кислорода на биологическую деструкцию органических загрязняющих веществ, оцениваемых по показателю БПК<sub>5</sub>. Таким образом, возврат иловой воды приводит к существенному увеличению энергопотребления очистных сооружений.

В связи с чем, при проектировании очистных сооружений должна рассматриваться система управления возвратными потоками иловой воды. [1]. Такая система может предусматривать т.н. дозированную подачу иловой воды на вход сооружений биологической очистки без обработки, отдельную обработку возвратных вод или комбинацию указанных методов. Возможность применения управляемого дозирования иловой воды в голову очистных сооружений оценивается по допустимой нагрузке по азоту с учетом содержания органических веществ в сточных водах, поступающих на биологическую очистку. При использовании указанного метода иловая вода из накопительной емкости обычно подается в голову очистных сооружений в периоды минимальных расходов сточных вод, поступающих на очистные сооружения, что позволяет избежать перегрузки азотными соединениями во время поступления максимальных расходов.

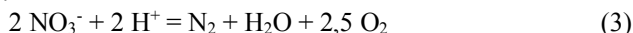
Применение метода управляемого дозирования иловой воды не требует строительства дополнительных сооружений для обработки иловой, за исключением накопителей, что является преимуществом способа. Вместе с тем существует ряд ограничений, которые могут привести к необходимости поиска альтернативных вариантов. В первую очередь, это соотношение между содержанием соединений азота и органических соединений, оцениваемых по БПК<sub>5</sub> или биоразлагаемой доле ХПК. Базовая технология

удаления азота из сточной воды на очистных сооружениях основана на двухстадийной микробиологической нитрификации с окислением аммония до нитрита (бактерии *Nitrosomonas*) и далее нитрита до нитрата (бактерии *Nitrobacter*) с последующей денитрификацией – восстановлением окисленных форм азота в процессе «нитратного дыхания» с образованием газообразного азота.

Нитрификация:



Денитрификация:



Для удаления 1 кг азота нитратов требуется более 5 кг органических соединений оцениваемых по биоразлагаемой доле ХПК. При высоких концентрациях азотных соединений в исходной сточной воде возможности по повышению содержания биоразлагаемых органических веществ за счет регулирования степени осветления на первичных отстойниках или их отключения, могут быть ограничены. Также следует учитывать снижение выработки биогаза, вызванного уменьшением поступления осадка первичных отстойников и увеличение расходов на обработку дополнительных объемов избыточного активного ила из-за большего прироста. В результате альтернативные варианты, основанные на удалении азотных соединений за счет дополнительной отдельной обработки иловой воды, могут оказаться предпочтительными.

В качестве способов обработки иловой воды с целью удаления азотных соединений могут рассматриваться методы физико-химической и биологической очистки. При этом в настоящее время наиболее распространены отдувка аммиака воздухом и биологическая очистка.

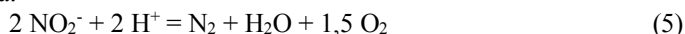
Азот в возвратных потоках иловых вод после обезвоживания сброженного осадка, преимущественно находится в форме аммонийного азота с концентрациями 700-850 мг/л. Формы содержания аммонийного азота и аммиака в воде зависят от pH и температуры и могут быть приведены в виде



При увеличении pH и температуры происходит сдвиг реакции 4 в левую сторону с увеличением концентрации молекулярного аммиака. Для повышения эффективности обработки при отдувке аммиака воздухом иловая вода предварительно обрабатывается щелочью для увеличения pH с последующей аэрацией. Простейшим примером реализации такой технологии является дозирование извести в накопительные емкости с иловой водой. При перемешивании и частичной аэрации происходит выделение аммиака в атмосферный воздух, а также связывание в нерастворимые соединения фосфора. Из-за газообразных выбросов аммиака в воздух, сопровождающихся

распространением запахов, такой упрощенный способ обработки имеет ограниченное распространение. Более совершенными являются схемы обработки иловой воды с отдувкой аммиака воздухом в закрытых реакторах с последующей отмывкой воздуха кислотными растворами. Такой подход позволяет утилизировать выделяющийся аммиак в виде сульфата аммония.

Другим направлением обработки иловой воды является ее биологическая очистка. Первоначально для удаления азота из иловой воды использовалась технология нитритации-денитритации, которая основана на окислении аммония до нитрита (уравнение 1) и угнетении реакции второй стадии - нитрификации окисления нитрита до нитрата (уравнение 2). Далее проводится денитритация в анокисных условиях с получением газообразного азота из нитрита:

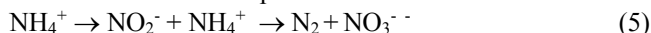


В сравнении с традиционной технологией нитрификации-денитрификации по уравнениям 1-3, удаление азота с использованием нитритации-денитритации позволяет снизить расход органических соединений оцениваемых по биоразлагаемой доле ХПК на 40 %, а также уменьшить затраты на аэрацию из-за снижения потребности в расходе кислорода на 25 %.

Ингибирование второй стадии окисления нитрита осуществляется различными способами – использованием периодической аэрации (чередованием интервалов времени около 20 минут с включением и отключением подачи воздуха), подщелачиванием с увеличением концентрации растворенного аммиака, повышением температуры иловой смеси более 23 °С, при которой начинается угнетение жизнедеятельности бактерий *Nitrobacter*.

Биологическая очистка возвратной иловой воды в настоящее время преимущественно основано на использовании анаэробного автотрофного процесса деаммонизации анамокс, который обеспечивается жизнедеятельностью специфических бактерий группы планктомицет.

Процесс основан на частичном окислении аммонийного азота до нитрита и последующей трансформации смеси нитритного и аммонийного азота в газообразный азот и частично нитрат:



Оптимальным соотношением между концентрациями нитритного и аммонийного азота является диапазон  $\text{NO}_2\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N} = 1,3:1$ .

В нитрат превращается около 10 % от исходного аммонийного азота.

При деаммонизации не требуется дополнительный источник органического углерода в сравнении с традиционной технологией денитрификации, также потребность в кислороде ниже на 60 % [2].

Для обработки иловой воды могут использоваться биологические реакторы как с прикрепленными формами микроорганизмов (биофильтры), так и реакторы со активным илом (проточные и циклические SBR). В

зависимости от варианта реализации анаэробное окисления аммония может производиться совместно при одностадийной обработке или с выделением в отдельную вторую стадию отдельно от образования нитрита, при двухстадийной обработке. Особенностью биологической обработки анаммокс является большой возраст бактерий группы планктомицет превышающий более 11 суток. В связи с чем существует задача их накопления в реакторе, в том числе за счет разделения избыточного активного ила с задержанием и возвратом в реактор ила, содержащего аннаммокс-бактерий. Указанная задача решается применением блоков тонкослойного отстаивания или гидроциклонов. Обработанная иловая вода как правило направляется в поток сточных вод перед сооружениями биологической очистки, либо частично при значительном содержании взвешенных веществ в первичные отстойники, при этом не допускается непосредственный сброс обработанной иловой воды в водные объекты.

### Литература

1. Канализация. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования, ТКП 45-4.01-321-2018 (33020) Утверждён и введён в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 67. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2018 –86 с.

2. Merkblatt DWA-M 349. Biologische Stickstoffelimination von Schlammwässern der anaeroben Schlammstabilisierung. DWA, Hennef, 2019, 85 S.

УДК [574+504] (576)

### **Оценка состояния поверхностных водозаборов и очистных сооружений с использованием беспилотных летательных аппаратов и средств дистанционной диагностики**

Левкевич В. Е.<sup>1</sup>, Бузук А. В.<sup>2</sup>, Лосицкий В. А.<sup>1</sup>, Саидов Ф.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ГУО Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

*В результате развития береговых процессов на водохранилищах (разрушение берегов, подтопление и заболачивание территорий) происходит изъятие пахотных и лесных угодий, нарушение условий жизнедеятельности населения – осложняются условия эксплуатации водозаборов (в том числе и поверхностных), а также эксплуатация очистных сооружений. Основой безопасной жизнедеятельности населения, проживающего непосредственно рядом с водохранилищами, и нормальной эксплуатации инженерных сооружений*

*является достоверная оценка объектов экономики, к которым относятся водозаборы, системы водоснабжения и водоотведения сельтебных территорий.*

Самым эффективным методом оценки состояния сооружений инженерной защиты, систем водоснабжения и водоотведения, сооружений очистки сточных вод являются их натурные обследования, как визуальными и инструментальными методами, так и современными методами с помощью аэрофотосъемки беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и использование данных космического зондирования с высоким разрешением.

Комплексное натурное обследование ряда водохранилищ Беларуси и сооружений на них (более 100 единиц) с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), проводимые специалистами Белорусского национального технического университета и Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси позволило оценить эффективность использования новой технологии сбора данных, а также установить нарушения в состоянии инженерной защиты водохранилищ, поверхностных водозаборов, водовыпусков и самих очистных сооружений связанные с заилением и занесением песчаным материалом оголовков, возникающие в результате вдольберегового перемещения наносов в прибрежной зоне водохранилищ [1].

В качестве тестовых водоемов для отработки применения БПЛА в условиях водных объектов были выбраны четыре водохранилища, по которым в течение ряда лет ведутся наземные стационарные наблюдения за динамикой береговых процессов, а также на которых расположены поверхностные водозаборы различных типов. К этим водохранилищам относятся: Дрозды, ТЭЦ-2, Чижовское (ТЭЦ-3).

Ключевыми параметрами дешифрирования материалов аэрофотосъемок явились ряд дешифровочных признаков [2]: ширина надводной и подводной частей литоральной зоны тестовых водохранилищ; ширина надводной зоны, подверженной деформациям; цвет и плотность изображения донных отложений и размываемого грунта коренных береговых склонов; форма и плановые очертания аккумулятивных и абразионных участков береговой линии; Идентификаторами береговых процессов являлись - наличие на фотографиях береговой зоны водохранилищ на границе вода-материк *репрезентативных участков* светлого и полусветлого тонов, которые соответствуют надводной и подводной составляющим береговой отмели. Изменение полутонов, тонов и оттенков позволили идентифицировать зоны транзита наносов и их аккумуляции и накопления, а также поступления пляжеобразующего материала на береговую отмель.

В ряде случаев используются материалы дистанционной диагностики



(космической съемки) береговой линии и участков в местах расположения водозаборов или очистных сооружений. В настоящее время технически возможно использовать для этой цели существующий Белорусский космический аппарат. Полученная информация в результате съемок подлежит обработке. Для условий Беларуси была разработана предметно ориентированная база данных (БД) искусственных водных объектов, предназначенная для повышения эффективности контроля (надзора) за техническим состоянием гидротехнических сооружений. Для анализа пространственно-распределенных данных используются геоинформационные системы (ГИС), которые объединяют картографические материалы в растровом и векторном виде, а также семантическую информацию в виде базы данных. Широко используются, как оригинальные продукты типа *Map Info*, *Arc View*, а также оригинальные разработки белорусских разработчиков ОИПИ НАН Беларуси (рис. 1).

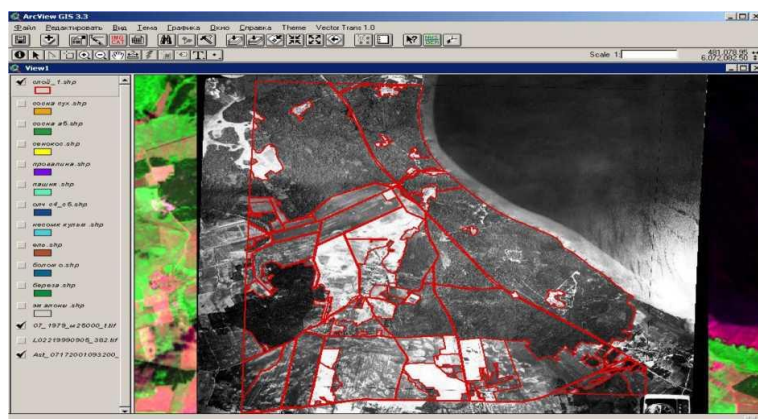


Рис. 1. Интерфейс ГИС Arc View с аэрофотоснимком береговой зоны водохранилища

Проведенные в период 2010-2019 гг. натурные исследования водохранилищного фонда страны позволили оценить состояние береговых водозаборов на тесовых объектах, а также дамб обвалования прудов очистных сооружений. (рис. 2).

Обследование ряда объектов показало, что конструкции и отдельные элементы водозаборных сооружений находятся в хорошем и удовлетворительном состоянии. В некоторых случаях наблюдается износ бетонных и металлических элементов. Обследование водохранилищ и сооружений на них позволило установить их заиление и занесение песчаным материалом, образующихся, при переработке берега.



Рис. 2. Поверхностный водозабор на водохранилище Дрозды

В безледный период 2019 г. была экспериментально апробирована методика регистрации деформации береговых склонов и оценки состояния дамб обвалования, их крепления, водозаборов и очистных сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Использование квадрокоптера профессиональной серии DJI Phantom 3 Professional, оснащенный системой позиционирования GPS, 3-х осевым стабилизирующим подвесом цветной видеокамеры 4K с разрешением 12 мегапикселей позволило получить HD видео в онлайн режиме и фотографии высокого разрешения (рис. 3).



Рис. 3. Квадрокоптер модели DJI Phantom 3 Professional

Полученные экспериментальные данные съемок позволили установить: 1) регистрация процесса разрушения берегов и креплений откосов дамб, плотин, водозаборов, очистных сооружений с помощью БПЛА, может использоваться при создании систем мониторинга; 2) с помощью БПЛА

возможно получение данных для оценки состояния подводной части водозаборов и очистных сооружений; 3) оценка влияния водных объектов на прилегающие территории требует использования, как спутниковой съемки высокого разрешения, так и съемки БПЛА с последующей интеграцией на основе ГИС-систем. Техническое состояние сооружения (водозабора или очистных сооружений) предлагается определять категорией и масштабом выявленных дефектов, которые агрегируются в отдельные диагностические комплексы и ранжируются по степени влияния на ту или другую конструкцию.

### Литература

1. Левкевич, В. Е. Поверхностные водозаборные сооружения на водохранилищах Беларуси / В. Е. Левкевич // Вестник БрГТУ. – 2019. – №2 (98) – С. 14–19.
2. Левкевич, В. Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : БНТУ, 2019. – 172 с.

УДК [574+504](576)

### **Экспресс-оценка и анализ причин возникновения деформаций откосов грунтовых ограждающих дамб шламохранилищ и водоемов очистных сооружений**

Левкевич В. Е.<sup>1</sup>, Миканович Д. С.<sup>2</sup>, Лосицкий В. А.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ГУО Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

*Рассматривается экспресс-оценка и анализ причин возникновения деформаций откосов грунтовых ограждающих дамб шламохранилищ и водоемов очистных сооружений.*

На территории Беларуси расположены ряд объектов, выполняющих функции очистных сооружений промышленных и технологических сточных вод и отходов производства. Крупнейшие объекты данного типа находятся в Солигорском районе Минской области. К которым относятся 22 шламохранилища отходов калийного производства Солигорского месторождения калийных солей (рис. 1).

К данному типу сооружений относятся также строящиеся объекты Петриковского и Любанского месторождений калийных солей.

Существуют на юге Беларуси аналогичного назначения пруды - накопители шламов (расположены на территории солевого завода, принадлежащего ОАО «Газпромтрансгаз Беларусь» в г. Мозырь (рис. 2).



Рис. 1. Ограждающие сооружения шламохранилищ Солигорского калийного комбината

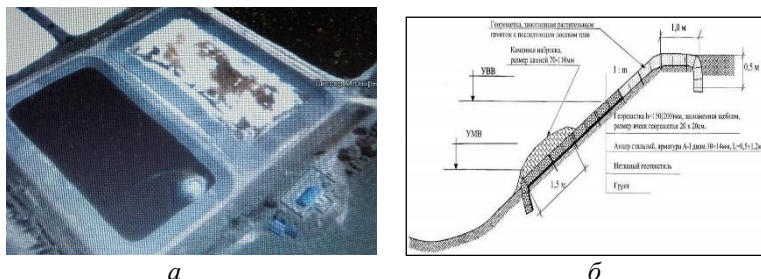


Рис. 2. Пруды-накопители рассолохранилища солезавода и реконструкция ограждающих дамб:

*а* – пруды накопители, *б* – конструкция крепления откосов дамбы георешеткой. Снимки с космического аппарата LandSAT 7 секций дамбы № 2 рассолохранилища

Кроме указанных водоемов имеется большое количество прудов биологической очистки очистных сооружений городских канализационных сетей. На всех перечисленных сооружениях, имеются грунтовые дамбы обвалования с незакрепленными откосами на которых происходит в результате воздействия на них различных факторов, развитие деформации (рис. 3). На закрепленных откосах каменной отсыпкой солигорских шламохранилищах, а также прудах накопителей Мозырского солевого комбината, где произведено крепление откосов геотекстилем и георешеткой, произошло разрушение значительных объемов крепления в виде обрушения защиты откосов. на протяжении более 400 м (рис. 4).

Экспресс-оценка, выполненная на шламохранилищах г. Солигорска включала осмотр, фото-видеофиксацию деформаций, инструментальные замеры, проведение шурфовочных работ и раскопок, отбор проб грунтов с последующим их лабораторным анализом, фиксацию фильтрационных и суффозионных процессов, а затем – изучение и анализ проектных и

эксплуатационных материалов, моделирование устойчивости откосов и определение причин нарушения обрушений.



Рис. 3. Деформации откосов ограждающей дамбы шламохранилища

Так, анализ оперативных данных по Солигорским шламонакопителям выявил отрицательное влияние на устойчивость откосов состава шламов, в которых присутствует большое количество ПАВ, полиакриламида и веществ, участвующих в обогащении солевых растворов. Наличие в фильтрующемся растворе шлама через тело дамб полиакриламида увеличивает скорость фильтрации по сравнению с чистой водой в 1,2–1,4 раза, тем самым увеличивая фильтрационный расход, и на выходе градиент скоростей, что ухудшает несущую способность грунтов и ведет к развитию эрозионных процессов (рис.3). Этот факт научно доказан в исследованиях Левкевича В. Е. и Микановича Д. С. (2019, 2020) (рис. 3).



Рис. 4. Деформация крепления откоса разделительной дамбы, секция № 1

Аналогичные процессы были обнаружены при анализе аварии на дамбах обвалования расслохранилища Мозырского солевого завода. При реконструкции креплений откосов ограждающих дамб в процессе проектирования были допущены серьезные ошибки в расчетах крепления георешеткой,

отклонения в технологии ведения строительных работ, а также при эксплуатации. В результате сложившейся ситуации через 2 месяца после ввода в 2017 г. в эксплуатацию объекта произошла авария – единовременное обрушение крепления откосов на двух ограждающих дамбах. Участок обрушения имеет протяженность более 400 м по фронту, что привело к значительному материальному ущербу. (рис. 4).

Заложения откосов дамб с креплением, как ограждающих, так и раздельной приведены в табл.

Таблица

Рекомендуемые коэффициенты верховых откосов дамб

Высота плотины $H_{пл}$ , м	средняя глубина водоема перед откосом $H$ , м	Коэффициент верхового откоса $m_2$		Максимальная высота волны $h_b$ , м
		Проектная (фактическая)	Прогнозная устойчивая	
5–8	4–7	3,0–3,5	8,0–15,0	0,5–0,8

Причины аварии были установлены на основе комплексного анализа всех собранных фактов, данных полевых обследований и компьютерного моделирования устойчивости откосов (рис. 5). Компьютерное моделирование обрушения (сползания) крепления откоса позволило визуализировать образование деформаций откоса и крепления в различные промежутки времени. Моделирование. С использованием различных схем и сценариев потери устойчивости крепления откоса позволило рассчитать значения коэффициента устойчивости в зависимости от положения уровней воды, уровня грунтовых вод в теле дамбы и мощности слоя пригрузки георешетки.

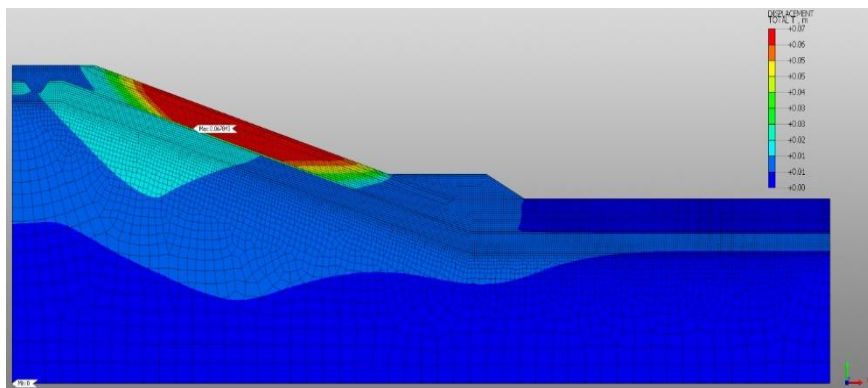


Рис. 5. Компьютерная модель. Схема 4. РС-1.  $K_3 = 1,70$

Практика проведения экспертных оценок показала, что использование методики экспресс-анализа факторов и причин, вызывающих чрезвычайную ситуацию, позволяет определять причину аварии с вероятностью 95 %. Так были определены причины аварии на откосах прудов биологической очистки на очистных сооружениях г. Слуцка, а также причины разрушения водосброса Млынокского водохранилища Ельского района Гомельской области.

УДК 628.1 (075.8)

### **Исследование технического состояния системы внутреннего водоснабжения здания СКТБ БНТУ**

Линкевич Н. Н.<sup>1</sup>, Лемеш М. И.<sup>1</sup>, Линкевич А. Н.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>УП «Минскводоканал»

Минск, Республика Беларусь

*Приведена методика натурных исследований систем внутреннего водоснабжения зданий. Описано техническое состояние системы внутреннего водоснабжения СКТБ с опытным хозяйством БНТУ и проведена его оценка. Обоснована необходимость капитального ремонта, замены элементов и конструкций.*

Для разработки проектной документации по капитальному ремонту (модернизации) СКТБ с опытным хозяйством БНТУ проводились натурные обследования и оценка технического состояния системы внутреннего водоснабжения в соответствии с ТНПА [1,2,3]. Исследования включали: визуальный осмотр здания, помещений, системы внутреннего водоснабжения; оценку технического состояния системы внутреннего водоснабжения; анализ проектной документации здания и разработку предложений по ремонту. При обследовании системы внутреннего водоснабжения здания производилось полное визуальное и детальное выборочное обследование наружных и внутренних поверхностей труб, фасонных частей и арматуры.

Здание объекта «Специальное конструкторско-технологическое бюро с опытным производством БНТУ по ул. Ф. Скорины в г. Минске» (рис. 1, а) трехэтажное с подвалом (цокольным этажом).

Наружные стены выполнены из железобетонных панелей и керамического кирпича. Покрытие – совмещенное из железобетонных плит. Водосток – внутренний. Протекания, в течение многих лет, практически всей площади кровли здания, привели к масштабной коррозии трубопроводов

системы внутреннего водоснабжения и канализации здания. Подвал (цокольный этаж) здания затоплен водой.



*а*

*б*

Рис. 1. Внешний вид здания СКТБ:

*а* – опытное хозяйство БНТУ, *б* – вид ввода водопровода в его здание

Система внутреннего холодного водопровода здания СКТБ представляет собой объединенный хозяйственно-питьевой, противопожарный и производственный водопровод. Подводящие трубопроводы к пожарным кранам размещаются в подвале, на первом, втором и третьем этажах. Внутренние сети водопровода выполнены из стальных труб диаметрами условного прохода от 15 до 100 мм (при этом из труб диаметрами 15, 20, 25 мм выполнены подводящие трубопроводы к водоразборным приборам и технологическому оборудованию; диаметром 65 мм – подводящие трубопроводы к пожарным кранам, диаметром 80 мм – противопожарные стояки, диаметрами 80 и 100 мм – магистральные трубопроводы). Пожарные краны отсутствуют, смонтированы только подводящие трубопроводы к ним. Запроектированы два ввода водопровода в производственный корпус СКТБ, которые расположены на первом и третьем этажах. Вводы закольцованы между собой и прокладываются в производственный корпус от учебного корпуса БНТУ № 20. По магистральным трубопроводам осуществляется присоединение к пожарным кранам, водоразборной арматуре и технологическому оборудованию. Ввод водопровода от водопроводного колодца ВК-23 в здание СКТБ размещен в подвале. Трубопровод обрезан у внутренней поверхности стены подвала, отрезок трубы отсутствует (рис. 1, *б*) и, соответственно, отсутствует от ввода В1 по распределительным магистральным трубопроводам присоединение к трем пожарным кранам.

На первом этаже пожарные краны не обнаружены, смонтированы только подводящие трубопроводы к ним в виде ответвлений. Магистральный распределительный трубопровод на первом этаже выполнен из стальных труб диаметром 80 мм, общей протяженностью 54,4 м и находится в неудовлетворительном состоянии, наблюдается коррозионное разрушение наружной и внутренней



поверхности труб, имеются участки сколов на нем. (рис. 2, а). К магистральному трубопроводу, который частично демонтирован, подключены стояки Ст. В1-4, Ст. В1-5 и Ст. В1-6. По проекту к указанному трубопроводу подключались стояки Ст. В1-2 и Ст.В1-3, но при обследовании подключения не обнаружены. Установлено, что отсутствует участок магистрального распределительного трубопровода, расположенного на первом этаже, в направлении к противопожарному стояку Ст. В1-2 и Ст. В1-3, трубопровод обрзан. Стояк подвержен интенсивной коррозии внутренней и наружной поверхности стенок. Противопожарный стояк Ст. В1-5, ответвление № 5 сильно подвержено коррозии. Ответвления № 6 к пожарному крану в помещении столярного участка и ответвления № 8 к пожарному крану в помещении ПАА не обнаружены и отсутствуют подводящие трубопроводы в данные помещения. При обследовании обнаружен только отрезок трубы, на вводе в помещение ПАА. Трубопровод сильно подвержен коррозии и разрушен, обнаружено отверстие в трубе (рис. 2, б).



Рис. 2. Вид магистрального трубопровода на первом этаже (а) и отрезка трубы в помещении ПАА с коррозионными повреждениями (б)

На втором этаже по проектным данным располагаются ответвления № 10–15, на третьем – № 16–21. Ответвления № 10 и № 16 к пожарному крану, а также ответвление № 21 на территории участка окраски не обнаружены. Противопожарный стояк Ст. В1-5 и ответвление № 20 сильно подвержены коррозии (рис. 3, а).

Магистральный трубопровод на третьем этаже выполнен из стальных труб диаметром 100 мм (по проекту 80 мм) протяженностью 56 м, обрзан на участке подводящего трубопровода от учебного корпуса БНТУ № 20 и подвержен коррозии. К нему подключены стояки Ст. В1-2, Ст. В1-3, Ст. В1-4, Ст. В1-5, Ст. В1-6 протяженностью каждого около 13,2 м.

Система внутреннего горячего водопровода состоит из магистрального подающего распределительного трубопровода из стальных труб диаметром условного прохода  $D_y = 20$  мм, проложенного под потолком первого этажа. При обследовании сетей установлено, что трубопровод частично демонтирован. Подающий трубопровод ( $D_y = 15$  мм) поднимается на 2-ой этаж. В

пределах обследуемой территории горячий водопровод не подключен к водоразборной арматуре. Подающий стояк горячего водопровода Ст. Т31-1 расположен в технологической нише, к большей части которой при обследовании не было доступа, (в части ниши, доступной для обследования стояк Ст.Т31-1 не обнаружен).



Рис. 3. Вид ответвления № 20:  
*а* – с коррозионными повреждениями,  
*б* – санузла второго этажа

На всех этажах подводящие трубопроводы внутреннего холодного и горячего водопровода к водоразборной арматуре и технологическому оборудованию подвержены сильным коррозионным разрушениям наружной и внутренней поверхности труб, частично демонтированы и находятся в неудовлетворительном состоянии. Санузлы везде завалены строительными отходами и элементами разрушенных конструкций (рис. 3, б). Сохранились отдельные элементы запорной арматуры. Водоразборная арматура не подключена. Стояки В1-1, В1-2, Т31-1 находятся в технологической нише, при обследовании к которой не было доступа, а в той части ниши, которая доступна для обследования – не обнаружены. На первом, втором и третьем этажах внутренний холодный водопровод смонтирован для подачи воды к санитарно-техническим приборам: унитазам, писсуарам, умывальникам и к автомату газированной воды. Горячий водопровод предназначен только для подачи воды к умывальникам.

На территории сварочного участка смонтировано ответвление к поливочному крану диаметром 25 мм, который демонтирован. На территории гальванического участка подающий трубопровод горячего водопровода диаметром 15 мм подводится с первого этажа, отсутствует фрагмент трубопровода, а на втором этаже обнаружены отдельные участки трубопроводов В5 и Т31.

Таким образом, все системы внутреннего водоснабжения СКТБ с опытным хозяйством БНТУ находятся в некомплектованном и аварийном состоянии и требуют капитального ремонта, замены элементов и конструкций.

## Литература

1. ТКП 45-1.04-305-2016. Техническое состояние и техническое обслуживание зданий и сооружений. Основные требования. – Минск: Минстройархитектуры, 2017. – 111 с.
2. ТКП 45-4.01-319-2018 Системы внутреннего водоснабжения и канализации зданий. Строительные нормы проектирования. – Минск: Минстройархитектуры, 2018. – 27 с.
3. ТКП 45-2.02-316-2018\*. Противопожарное водоснабжение. Строительные нормы проектирования. – Минск: Минстройархитектуры, 2018. – 34 с.

УДК 628.1: 004.65

### **Перспективы применения ГИС-технологий для водопроводно-канализационного хозяйства**

Рожко С. Н., Вага И. И., Кравченко А. А.  
Институт жилищно-коммунального хозяйства  
Национальной академии наук Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

*В статье рассмотрены особенности применения геоинформационных систем (ГИС) в отрасли водопроводно-канализационного хозяйства, выполнен анализ перспективных направлений их внедрения.*

При наличии различных подходов к управлению предприятиями водопроводно-канализационного хозяйства (далее – ВКХ) в европейских странах и Республике Беларусь проблемы развития остаются идентичные: высокий уровень износа инженерных сетей, недостаточный объем инвестиций в модернизацию систем водоотведения и рост тарифов.

На сегодняшний день на территории Республики Беларусь можно выделить ряд факторов, которые негативно сказываются на функционировании и эффективности отрасли водопроводно-канализационного хозяйства. К ним можно отнести:

- ведомственную разобщенность и отсутствие единой системы управления и планирования отрасли ВКХ городов и населенных пунктов республики;
- наличие многопрофильных предприятий жилищно-коммунального хозяйства (далее – ЖКХ) со специализированными подразделениями ВКХ, а также обособленные предприятия ВКХ (отсутствие единой политики/стратегии функционирования предприятий);

- внесение изменений в организационно-правовое регулирование предприятий ВКХ без проведения технико-экономического аудита;
- неисполнение положений и законодательных актов в части развития и модернизации систем водоснабжения и водоотведения (далее – ВиВ);
- отсутствие системы четкого разграничения прав и обязанностей (договорных отношений) между собственником инженерной инфраструктуры и эксплуатирующим объекты ВиК предприятием;
- передача на баланс организаций ВКХ непрофильных активов (столовые, бани, общежития, спортивные объекты и др.) и дальнейшая их эксплуатация, что ведет к перераспределению финансовых средств, необходимых на модернизацию (реконструкцию) систем ВиК;
- неэффективное распределение трудовых ресурсов с наличием большого штата сотрудников (от 3 до 8 человек на 1000 лицевого счета), что свидетельствует о нерациональном расходовании денежных средств предприятий.

Таким образом, для решения имеющихся проблем, необходимо определить механизмы действий, «инструменты», и разработать стратегию развития отрасли ВХК.

Одним из инструментов совершенствования в развитии отрасли ВКХ будет внедрение геоинформационных систем (далее – ГИС).

ГИС представляет собой программное обеспечение, предназначенное для контроля и учета сетей водоснабжения и водоотведения, наладки их работы в оптимальном режиме, снижения затрат на транспортировку ресурса, уменьшения количества утечек питьевого водоснабжения и отображения существующей системы водоснабжения города в режиме реального времени [1].

ГИС обеспечивает следующие показатели:

- высокая скорость работы с большим объемом графических данных;
- отсутствие ограничений на объем вводимой информации;
- возможность работы с серверами;
- хранение семантической информации в серверной базе данных, имеющейся на предприятии;
- возможность построения математической модели любой инженерной коммуникации;
- переход на единый цифровой формат взаимодействия между различным программным обеспечением;
- прозрачность всех технологических и финансовых процессов.

Мировая практика показывает эффективность использования ГИС в различных сферах деятельности включая отрасль ВКХ. В настоящее время около 15 % территории Республики Беларусь покрыто ГИС ВКХ. Так, с

2013 года ГИС используется на ГУКПП «Гродноводоканал», в том числе локально на электронных планшетах.

Проведение эффективной политики ГУКПП «Гродноводоканал» в части модернизации отрасли, реализация мероприятий по автоматизации и диспетчеризации объектов ВКХ, внедрение ГИС, несмотря на рост количества лицевого счетов и протяженность сетей водоснабжения, показало значительное сокращение энергозатрат на водоснабжение города, что также свидетельствует о положительном эффекте проводимых мероприятий.

Опыт внедрения использования ГИС также эффективно сказался на сокращении списочной численности работников: с 813 человек в 2013 году, до 718 человек в 2019 году. Использование электронных планшетов, а также отслеживание функционирования системы водоснабжения в режиме реального времени позволило значительно сократить затраты на локализацию аварий с 7211 часов в 2013, до 3880 часов в 2019 году.

Использование ГИС на предприятиях ВКХ в Республике Беларусь является одним из первоначальных этапов перехода отрасли на новый информационный уровень. Развитие информационных систем показывает существующую тенденцию перехода к цифровизации всех аспектов деятельности человека.

В результате мы получаем переход от локальной автоматизации и цифровизации отдельных объектов (предприятий) к комплексной автоматизации головных объектов (руководящих предприятий), которая включает не только автоматизацию технологических процессов, но также автоматизацию и цифровизацию документооборота на предприятии.

Переход к «цифровому» производству (предприятию), так называемому «Цифровому водоканалу» основан не только на моделировании производственных процессов, обмене информацией между различным программным обеспечением, но и в оптимизации управления, открытости и прогнозируемости всех процессов производства и распределения энергоресурсов. Мы получаем цифровую трансформацию бизнес модели: производство – обеспечение – сбыт – управление [2].

Основными целями перехода к «Цифровому водоканалу» будут являться:

улучшение качества обслуживания абонентов;

- снижение операционных издержек;
- снижение рисков и управление производственными активами;
- совершенствование финансово-хозяйственного управления ресурсами;
- совершенствование коммуникационных, вычислительных и защитных средств;

достижение кадрового прогресса путем эффективного взаимодействия и подготовки персонала.

Для «Цифрового водоканала» характерны три основных признака:

1. Компьютеризация всех рабочих мест.
2. Использование современного программного обеспечения для моделирования всех технологических и финансовых процессов.
3. Создание на предприятии единого информационного пространства, основанного на цифровом формате, с помощью которого все подразделения организации могут оперативно и своевременно обмениваться информацией.

В результате внедрения «Цифрового водоканала» снизятся количество потерь на сетях водоснабжения, время локализации и устранения аварийных ситуаций, сократятся трудозатраты сотрудников, затраты на электроэнергию, снизится дебиторская задолженность, увеличатся фактические поступления денежных средств и начисления за потребление ресурса при осуществлении самовольных подключений.

Сбор всех данных и их аккумулирование в одно информационное пространство позволит обеспечить полную прозрачность для абонента и ликвидировать информационный барьер через средства цифровых коммуникаций, таких как сайт водоканала, личный кабинет абонента, цифровые услуги.

Переход на цифровые технологии позволит создать единую, высоконадежную информационную среду города, повысить эффективность уже существующих процессов управления инженерными сетями, сократить негативное влияние человеческого фактора на эксплуатацию инженерных коммуникаций и повысить качество обслуживания потребителей.

Таким образом, для повышения эффективности работы отрасли ВКХ, внедрения ГИС, а также полного стратегического планирования необходима разработка концепции: «Цифровой водоканал». Реализация целей на практике обеспечит поступательное цифровое развитие как водоканалов, так и предприятий ЖКХ.

Развитие цифровизации, внедрение ГИС и общего понятия «Умный водоканал», позволит выйти на новый уровень предоставления услуг населению в соответствии со стандартами стран – мировых лидеров по индексу качества жизни; пересмотреть и усовершенствовать технологические процессы, применяемые в системе ВКХ в настоящее время; внедрить и адаптировать новейшие технологии на предприятиях ЖКХ; разработать и использовать энергоэффективные и экологические технические средства.

### **Литература**

1. Концепция совершенствования и развития жилищно-коммунального хозяйства до 2025 года, утвержденная постановлением Совета Министров

Республики Беларусь 29.12.2017, № 1037 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file34e37cb338aada3e.PDF>. – Дата доступа: 01.05.2020.

2. Баженов, В.И. Цифровой водоканал – миф или реальность / В.И. Баженов [и др.] // Наилучшие достигнутые технологии водоснабжения и водоотведения. – 2017. – № 6. – С. 38–48.

УДК 631.3

### **Применение водоподъемного оборудования с синхронным приводом на постоянных магнитах – путь к снижению расхода электроэнергии на водозаборах Республики Беларусь**

Китиков В. О.<sup>1</sup>, Башко Ю. А.<sup>1</sup>, Козорез А. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси»

<sup>2</sup>ОАО «Завод Промбурвод»

Минск, Республика Беларусь

*В статье приведен сравнительный анализ энергоэффективности скважинных насосных агрегатов с приводом посредством погружных синхронных электродвигателей на постоянных магнитах и асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, представлены результаты расчёта показателей энергоэффективности агрегатов электронасосных с синхронным приводом, полученные по результатам заводских испытаний насосных агрегатов с сравниваемыми приводами, а также показатели эффективности применения водоподъемного оборудования с синхронным приводом на постоянных магнитах в процессе подконтрольной эксплуатации в условиях ВКХ Республики Беларусь.*

В структуре затрат на производство услуг водоснабжения одним из основных показателей является расход электроэнергии, составляющий около 25 %, в том числе доля затрат на подъем воды из водозаборной скважины, составляет по разным данным 17 – 19,2 % и более.

Сегодня, во всех странах, где уделяется особое внимание повышению энергетической эффективности процесса подъема воды из артезианских скважин, выделяется тенденция применения электронасосных агрегатов с синхронными двигателями. Они являются менее энергоемкими в сравнении с существующими агрегатами с асинхронным приводом.

Синхронные электродвигатели отличаются более высоким КПД и соответственно, полезной нагрузкой. Изменение нагрузки, приложенной к валу ротора электродвигателя, не оказывает влияния на частоту его вращения.

При ударных нагрузках сохраняется постоянство частоты вращения двигателя и рабочего колеса насоса.

Принимая во внимание преимущества синхронных электродвигателей для привода погружных скважинных насосов в ОАО «Завод Промбурвод» создан типоразмерный ряд электродвигателей шестидюймового габарита с ротором на постоянных магнитах, который, закрывается тремя типоразмерами синхронного электродвигателя.

Конструктивной особенностью работы синхронного электродвигателя является равенство скорости вращения ротора и скорости вращения магнитного потока (поля). С учетом этого для его запуска и работы обязательно требуется система управления с частотным преобразователем.

Оснащение насосного оборудования погружным синхронным электродвигателем и устройством управления дало возможность создания ОАО «Завод Промбурвод» высокоэффективной системы подачи воды СВ-6, представленной на рисунке.



Рис. Система подачи воды высокоэффективная СВ-6

С целью определения эффективности применения синхронного привода на базе испытательной лаборатории ОАО «Завод Промбурвод» были проведены серии заводских испытаний погружных скважинных насосов типа СПА8-80-нро в составе электронасосных агрегатов с синхронными приводами СВ-6 из типоразмерного ряда 6” габарита двигателей производства ОАО «Завод Промбурвод» и асинхронными аналогами «Franklin Electric».

На основании результатов испытаний произведен расчет удельной потребляемой мощности на 1 м<sup>3</sup>/ч и 1 м напора и относительный показатель снижения (экономии) удельной потребляемой мощности, который показал, что удельная потребляемая мощность у электронасосных систем с синхронным приводом ниже, чем у агрегатов с асинхронными двигателями-аналогами от 9,51 до 12,55 %.



Принимая во внимание тот факт, что повышение эффективности и надежности оборудования связано с определенными материальными затратами произведен расчёт показателей экономической эффективности применения систем электронасосных с синхронным приводом.

Расчёт проводился, с применением стандартных методик оценки экономической эффективности новой техники [1, 2, 3] и программного обеспечения Microsoft «Excel», для образца системы высокоэффективной СВ–6 (26 кВт) имеющего наименьший показатель снижения удельной потребляемой мощности на 1 м<sup>3</sup>/ч и 1 м напора (9,51 %) в сравнении с асинхронным электродвигателем (26 кВт) «Franklin Electric» (аналогом), имеющим наибольшую стоимость, (асинхронный электродвигатель (26 кВт) «Franklin Electric» – 6 380 бел. руб. и система синхронная СВ–6 (26 кВт) ОАО «Завод Промбурвод» – 11 770 бел. руб. (в ценах на 01.10.2019 г.)).

Результаты расчета экономической эффективности применения системы высокоэффективной СВ–6 в сравнении с базовым асинхронным агрегатом «Franklin Electric» показали что, при снижении удельной потребляемой мощности на 9,51 % предполагается годовая экономия электроэнергии до 27 156 кВт ч.

Расчетный экономический эффект от внедрения системы подачи воды СВ–6 составляет порядка 7 414 бел. рублей (около 3,5 тыс. у.е.) (в ценах на 01.10.2019 г.) при стоимости оборудования 11 770 бел. руб. без НДС.

При этом простой срок возврата дополнительных капитальных вложений составляет порядка 1,63 года, а динамический срок возврата дополнительных капитальных вложений – 1,88 года.

В настоящее время ведется широкая проверка эффективности применения водоподъемного оборудования с приводом от синхронных систем в производственных условиях на водозаборных скважинах водоканалов городов: Минска, Молодечно, Борисова.

Так водозабор «Фелицианово» УП «Минскводоканал» с октября 2017 года работает на таких системах. За время эксплуатации получена экономия электроэнергии в размере 9,8 %. В первом квартале текущего года, введен в эксплуатацию второй водозабор «Боровляны» этого предприятия, где все скважины оборудованы электронасосными агрегатами с приводом от синхронных систем. За квартал эксплуатации получена экономия в 18 %. На предприятии также ведутся проектные работы на использование высокоэффективных систем еще трех водозаборов.

24 июня 2019 года на станции первого подъема водозабора «Геленёво» в скважине № 11 УП «Молодечноводоканал» была введена в эксплуатацию высокоэффективная система производства ОАО «Завод Промбурвод».

Высокоэффективная система состоит из погружного синхронного электродвигателя на постоянных магнитах собственного производства мощностью 9,3 – 18,5 кВт, погружного скважинного насоса СПА 6-60-55нро и частотного преобразователя для управления двигателем мощностью 13 кВт, шкафа с управления с передачей данных потреблённой электроэнергии и расхода воды. За 6 месяцев эксплуатации наработка составила 4270 часов безотказной работы, за которые было потреблено всего 64904 кВт электроэнергии. Отключений системы за этот период эксплуатации не происходило. Отказов и сервисных работ системы не производилось. На протяжении полугода система выдавала стабильные показатели: потребляемая мощность составляет 15,2 кВт, что на 10 % ниже чем у аналогичного агрегата с асинхронным приводом; потребляемые токи составляют 22,5 А, что на 30 % ниже асинхронного аналога; удельный показатель составил 0,2465 кВт/м<sup>3</sup>, что на 10 % ниже. Срок окупаемости данной системы рассчитан на 18 месяцев [4].

В заключение следует отметить, что результаты заводских испытаний и производственной проверки подтверждают эффективность применения синхронного привода в системах подачи воды из скважин, при достаточно высокой стоимости синхронных систем (стоимость высокоэффективных синхронных систем примерно в 1,7 – 2,6 раза выше, чем асинхронных) срок окупаемости их не превышает два года.

### Литература

1. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей ТКП 151–2008 (02150). Технический кодекс установившейся практики: ОСТ 10.2.18– 2001. – Минск: Минсельхозпрод, 2001. – 14 с. 2.
2. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки: стандарт отрасли: ОСТ 10.2.18–2001. – Минск, 2001. – 32 с.
3. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / М-во сельского хоз-ва и продовольствия Рос. Федерации; Всерос. науч.-исслед. ин-т экономики сельского хоз-ва. – М., 1998. – 219 с.
4. Итоги подконтрольной эксплуатации водоподъемного оборудования с синхронным приводом на постоянных магнитах, 28 декабря 2019 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://promburvod.com/coverco.html>. – Дата доступа: 11.05.2020.

## Модификация фильтрующих загрузок для очистки подземных вод

Пропольский Д. Э.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

*В Республике Беларусь основным источником питьевого водоснабжения являются подземные воды, качество которых нормируются СанПиН 10-124 РБ 99. Использование питьевой воды, не соответствующей данным требованиям, приводит к неблагоприятным последствиям на организм человека и систему водоснабжения. Для целей водоподготовки могут быть использованы системы многослойных фильтров из различных материалов. Перспективным направлением является разработка модифицированных с помощью различных покрытий фильтрующих материалов. В данной работе представлены разновидности таких покрытий и их назначение.*

По своему происхождению гранулированные фильтрующие материалы можно разделить на природные (кварцевый песок, доломит, керамзит, антрацит, активированный уголь, цеолит и др.), синтетические и модифицированные материалы. Наиболее изученными материалами являются активированный уголь, диоксид кремния, кварцевый песок, цеолит. Также возрос интерес к разновидностям биоугля из отходов [1].

Модифицированные материалы изготавливаются путём термической, химической или физико-химической обработки исходного материала. Достоинствами использования таких материалов являются возможность изменять и улучшать характеристики исходного материала, использовать для модификации дешёвые исходные материалы либо переработанные отходы производства. Химический метод модификации применим при необходимости изменения химического состава поверхности путём проведения химической реакции на поверхности исходного материала. Физико-химический метод также позволяет изменять морфологические характеристики исходного материала, такие как текстура, шероховатость, механическая прочность, химическая стойкость материала. Перспективным методом модификации является нанесение специальных покрытий на поверхность исходного материала. Такой метод применим при необходимости удаления тяжёлых металлов из подземных вод, инактивации микроорганизмов, удалении нитратов и фосфатов, обезжелезивании.

Использование питьевой воды с повышенным содержанием тяжёлых металлов оказывает пагубное влияние на здоровье человека, такое как изменение структуры белка и нуклеиновых кислот в организме, изменение обмена

веществ, структуры и проницаемость клеточных мембран. Для удаления ионов металлов может быть использована модифицированная фильтрующая загрузка со специальным покрытием на своей поверхности. Традиционно, получение такого покрытия осуществляется путём замачивания исходного материала в растворе солей, хлоридов, карбонатов, сульфатов и оксидов металлов. С последующими стадиями сушки, термической обработки, промывки.

При высоком содержании микроорганизмов требуется обеззараживание подземных вод. Использование в таких случаях модифицированных фильтрующих материалов существенно снижает экономические затраты в сравнении с использованием традиционных методов инактивации микроорганизмов (хлорирование, озонирование, УФ-облучение [2]). Примерами такой модификации является обработка поверхности материала наночастицами, например, модификация с помощью хлорированного серебряного покрытия, обработка материала хлоридом или оксидом цинка [3–5].

Наличие нитратов в подземной воде обусловлено минерализацией органических соединений азота (расщепления белков на аминокислоты с последовательным образованием нитритов и нитратов). Повышенная концентрация таких элементов в результате загрязнения источника водоснабжения частицами отмерших растений и животных, неисправности очистки хозяйственно-бытовых сточных вод приводит к образованию водорослей и эвтрофикации. Также при загрязнении земель удобрениями и бытовыми сточными водами наблюдается рост жизнедеятельности фото- и зоопланктонов и повышение концентрации фосфатов в природной воде.

Удаление нитратов и фосфатов возможно при обработке исходного материала хлоридами и карбонатами кальция и магния, нанесение на поверхность материала лантан композитов методом химического осаждения либо гидротермическим синтезом, использование модифицированного с помощью алюминия и меди исходного материала.

Эффективное удаление ионов железа, марганца, мышьяка с помощью модифицированной загрузки возможно при нанесении на поверхность железо- и марганецсодержащих фаз и др. Для этого применима обработка растворами хлорида и оксидов марганца, сульфата и оксида железа, перманганата калия, трифосфата или сульфита натрия, оксидов кальция или магния.

В предыдущих исследованиях [1, 3, 4] была изучена эффективность обезжелезивания подземных вод с использованием модифицированного активированного угля с покрытием из оксида железа и цинка методом экзотермического горения в растворах. В исследованиях представлены лабораторные исследования морфологии и поверхности материала.

## Литература

1. Propolsky, D. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky, E. Romanovskaia, W. Kwapinski, V. Romanovski // Environmental Research. – 2020. Vol. 182. – P. 108996.
2. Romanovski, V. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective / V. Romanovski, P. M. Claesson, Y. S. Hedberg // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2020. – 27(11). – 12704–12716.
3. Пропольский, Д. Э. Эффективность обезжелезивания подземных вод с использованием модифицированных каталитических материалов / Д. Э. Пропольский, В. И. Романовский // Технологія-2019 : матеріали XXII Міжнар.наук.-техн. конф., 26-27 квіт. 2019 р., м. Северодонецьк : в 2 ч. – Северодонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2019. – Ч. 1 – С. 85–86.
4. Пропольский, Д. Э. Применение полифункциональных модифицированных материалов для комплексной очистки подземных вод / Д. Э. Пропольский, С. В. Красковский // Технологія-2020 : матеріали XXIII Міжнар.наук.-техн. конф., 24-25 квіт. 2019 р., м. Северодонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2020. – С. 95.
5. Huang T. et al. Fast and cost-effective preparation of antimicrobial zinc oxide embedded in activated carbon composite for water purification applications // Materials Chemistry and Physics. – 2018. – Т. 206. – С. 124–129.

УДК 628.27

### Методы мониторинга состояния канализационных сетей

Карченя И. В.  
УП «Минскводоканал»  
Минск, Беларусь

*Рассмотрены методы мониторинга сетей бытовой канализации, изменяющиеся производством «Минскочиствод» УП «Минскводоканал» при эксплуатации.*

Одной из задач предприятий водопроводно-канализационного хозяйства является обеспечение бесперебойного водоотведения, представляющего собой совокупность мер, инженерных коммуникаций и сооружений для приема и отведения сточных вод. В результате роста городов неизбежно увеличивается протяженность сетей бытовой, производственной, дождевой канализации. В процессе эксплуатации возникают инциденты на напорных и безнапорных сетях:

- случайные засорения;
- повреждения трубопроводов и сооружений на них.

Для предотвращения, ликвидации аварийных ситуаций на сетях хозяйственно-бытовой канализации производством «Минскочиствод» УП «Минскводоканал» проводится сбор, хранение, обработка информации о состояниях сетей.

В основе методов мониторинга состояний сетей бытовой канализации лежит визуальный осмотр сетей, регламентированный инструкцией [1]. С введением в работу системы оперативно-технического учета объектов УП «Минскводоканал» (СОТУ) обеспечивается возможность наиболее досконального обследования действующих сетей. Вид СОТУ представлен на рисунке.

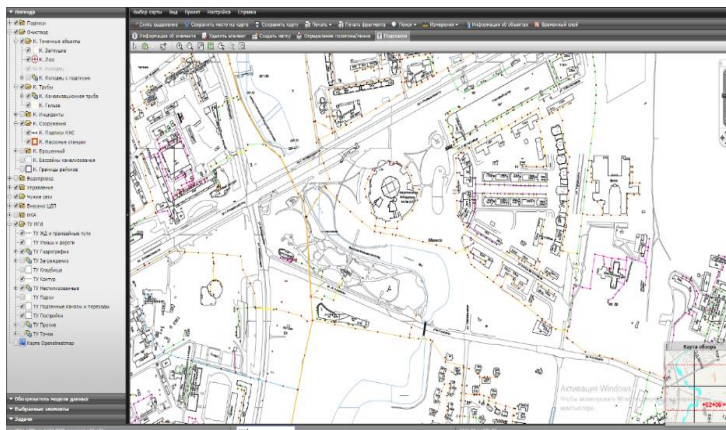


Рис. Система оперативно-технического учета УП «Минскводоканал»

В результате наружного осмотра выявляется большая часть дефектов, ликвидация которых носит превентивный характер для возникновения аварийных ситуаций, нанесения вреда экологии и предотвращения несчастных случаев:

- разрушение элементов смотровых колодцев;
- смещения стеновых колец;
- трещины в конструктивных элементах смотровых колодцев;
- отсутствие герметичности стыков железобетонных элементов в смотровом колодце;
- отсутствие заделки труб в отверстиях смотровых колодцев;
- отслоения защитных слоев бетона, оголенная арматура, подверженная коррозии;
- отсутствие либо дефекты крышек люков, скоб, лестниц в смотровых колодцах;

- просадки грунта;
- подтопление территорий;
- засорения.

Тем не менее, данный вид обследования сетей не позволяет обнаружить скрытые дефекты, которые могут привести к полной остановке процесса водоотведения. Для обнаружения таких дефектов, в основном, используются локальные методы обследования системы канализации.

В процессе работы системы инциденты, возникающие на сетях, фиксируются диспетчерской службой УП «Минскводоканал», информация об аварийных участках фиксируется в СОТУ. Систематизация и анализ полученных данных по местам и количеству случайных засорений позволяет выявлять потенциально дефектные участки сети. Для обследования данных участков разрабатываются планы, в соответствии с которыми сеть хозяйственно-бытовой канализации обследуется телевизионной установкой.

На данный момент в подразделениях УП «Минскводоканал» имеется возможность обследования сетей камерами четырех типов:

- камера проталкиваемого типа(ручная) – представляет собой лебедку с кабелем проталкивания, зондом и камерой и блок управления vCamModular-R, позволяющая записывать и воспроизводить видео, добавлять текстовую и звуковую информацию. При помощи импульсного передатчика можно определить местоположение камеры с поверхности земли, для локализации положения и глубины камеры используется локатор трубопроводов и кабелей;

- телевизионные установки ИВАК Heimut Hunger на базе автомобиля-лаборатории – представлены тремя видами камер в зависимости от метода перемещения по трубопроводу и принципа записи изображения:

1. Камера-трактор, управляемая оператором из автомобиля-лаборатории, соединенная кабелем с лебедкой, оснащен колесным двигателем и механизмом, позволяющим вращать камеру относительно двух осей. Камера оснащена датчиками, позволяющими снимать показания уклона в данный момент времени, что позволяет строить интегральный график и определять уклон трубопровода в каждой точке;

2. Камера на плавающем основании, управляемая оператором из автомобиля-лаборатории и двумя людьми, находящимися вблизи смотровых колодцев обследуемого профиля, позволяющая проводить осмотр коллекторов диаметром более 500мм без остановки водоотведения;

3. Панорамная камера-трактор, позволяющая при помощи специального программного обеспечения PANORAMO и двух объективов типа «рыбий глаз» записывать 360° поверхности трубопровода, причем анализ может проводиться без ограничений по управлению камерой.

Обследование сети данными установками позволяет точно определять места повреждений и их характер, в зависимости от полученных результатов можно принимать решение о последующих действиях с системой, основываясь на фактическом состоянии, а не документальных сведениях, таких как год постройки и нормативный срок службы трубопровода.

Отдельно стоит вопрос поступления неорганизованных расходов воды в систему хозяйственно-бытовой канализации. Существуют различные пути поступления таких расходов воды:

- поступление грунтовых вод через трещины, проломы, негерметичные стыковые соединения трубопроводов и смотровых колодцев;
- поступление сточных, дождевых и талых вод через самовольные подключения различных типов (подключения хозяйственно-бытовой канализации, дождеприемников; замена герметичных крышек люков на люки дождеприемников и т.п.).

Самовольные подключения в основной массе выявляются при наружном осмотре сетей по схемам СОТУ. Также работниками производства «Минскочиствод» проводятся плановые осмотры внутриплощадочных сетей промышленных предприятий и иных ведомственных сетей на предмет таких подключений. Выявление избыточного поступления сточных вод может проводиться путем анализа и сопоставления данных по водоотведению от абонентов и расходов сточных вод, проходящих через канализационные насосные станции.

Наличие поступления грунтовых и поверхностных сточных вод может устанавливаться путем осмотра внутренней поверхности трубопровода телевизионной установкой, либо при осмотре сети с установкой пневматических заглушающих устройств для остановки водоотведения вышележащих участков. В количественном выражении определение притока воды возможно измерить по наполнению трубопровода, однако данный способ может иметь большую погрешность в связи с фактической конфигурацией трубопровода (опыт эксплуатации показывает, что на одном участке трубопровода могут наблюдаться различные наполнения из-за изменений уклона и возникновения кривых подпора и спада). Другим и более точным способом является химический анализ концентраций веществ в воде (для проведения измерений можно использовать в том числе сточные воды).

### **Литература**

1. Инструкция о порядке проведения планово-предупредительного ремонта на централизованных системах водоснабжения и водоотведения: утверждена постановлением Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь от 12 мая 2006 г. № 22.



2. Технические требования УП «Минскводоканал» к проектированию повысительных насосных станций при новом строительстве и реконструкции (ТР 01- 09 -2019 от 26.10.2018 г.).

УДК 628. 316

**Экологичная и ресурсосберегающая реагентная технология совместной очистки сточных вод, содержащих лакокрасочные материалы в машиностроении**

Мороз В. В.

Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь

*Разработана и внедрена ресурсосберегающая технология очистки сточных вод загрязнённых ЛКМ, которая позволяет повторно использовать воду в производственном цикле предприятия. Технология позволяет снизить затраты предприятий на ее очистку и негативное воздействие на окружающую среду, уменьшить нагрузку на городские очистные сооружения, снизить затраты на оборудование.*

Получение лакокрасочных покрытий в машиностроении – это технологический комплекс операций, включающий в себя подготовку поверхности изделий, нанесение лакокрасочных материалов. Из множества методов покраски, в большинстве случаев, нанесение лакокрасочных материалов производят пневматическим распылением, причем этот метод наиболее опасен в экологическом отношении [1].

Большинство предприятий приборо– и машиностроительного профиля имеют участки покрасочного производства, а также цеха подготовки деталей под покрытие лакокрасочными материалами. Сточные воды, образующиеся в гидрофилтрах покрасочных камер, ваннах травления, фосфатирования и промывки перед сбросом в канализацию должны быть подвергнуты очистке до допустимых норм.

Возникает ситуация, при которой необходимо разработать такое технологическое решение, которое должно быть ресурсосберегающим, экологичным и по возможности можно реализовать в рамках традиционных очистных сооружений.

Такая технология была реализована и внедрена в производство на Брестском электромеханическом заводе (ОАО «БЭМЗ»). Данная технология проста, экономична, малоотходна [2, 3].

Эта технология не требует дополнительных площадей и оборудования, сопоставимых по стоимости с традиционными очистными сооружениями

сточных вод гальванического производства. Принцип реализации данной технологии осуществлен с использованием имеющегося оборудования и коммуникаций. В технологических процессах нанесения защитных покрытий используется широкий спектр веществ, которые превращаются в отходы, сходные по составу с реагентами, применяемыми при очистке сточных вод, содержащей органические загрязнения. То есть имеют место предпосылки для многократного снижения объема используемых товарных реагентов, а значит и неизбежного вторичного загрязнения сточных вод.

Проведенные исследования заключались в установлении возможности и целесообразности объединения потоков сточных вод, содержащих хром и лакокрасочные загрязнения с последующей их обработкой по традиционно принятой реагентной схеме очистки сточных вод гальванического производства [3, 4]. Упрощенная схема обработки сточных вод, содержащих лакокрасочные материалы, изображена на рис.

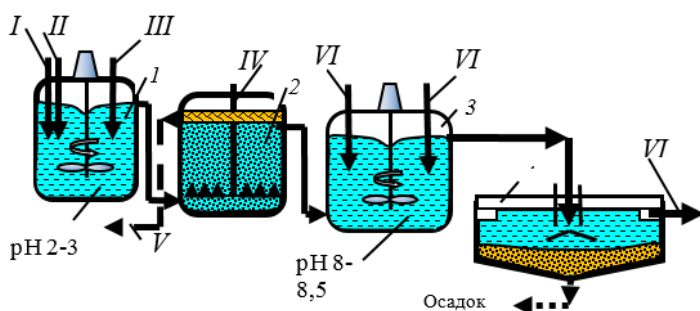


Рис. Упрощенная схема «попутной» обработки сточных вод, содержащих лакокрасочные материалы:

- 1 – реактор обработки хромосодержащих сточных вод, 2 – ёмкость для продувки сжатым воздухом, 3 – реактор-нейтрализатор всех видов сточных вод, 4 – осветлитель, I – сточные воды, содержащие лакокрасочные загрязнения, II – сточные воды содержащие хром (III), III – отработанные технологические растворы, содержащие железо (II и III), IV – сжатый воздух, V – пенный продукт, VI – нейтрализующие растворы, VII – кислотно-щелочные сточные воды, VIII – осветлённые сточные воды

Для отработки режимов технологического процесса очистки исследования были условно разбиты на три этапа:

– на первом этапе выяснялся эффект окисления органических веществ хромосодержащим стоком и кислородом воздуха.

Сточные воды, содержащие лакокрасочные материалы смешивались со сточными водами, содержащими хром. В сточные воды, содержащие хром,

предварительно вводилось рассчитанное количество травильного раствора; при необходимости смесь подкисляли серной кислотой до  $\text{pH} = 1,5 \div 2,0$ . Далее смесь сточных вод подвергалась продувке воздухом. При продувке смеси воздухом кроме окисления органических примесей происходит выделение из воды избыточного количества углекислого газа, образование на поверхности газовых пузырьков зародышей твердой фазы продуктов гидролиза, а также специфическое механическое перемешивание воды пузырьками воздуха. Кроме того, при продувке образуется устойчивый слой пены. На основании этого следует, что часть органических примесей, СПАВ, уносятся в пенный продукт для удаления на обезвоживание

*– на втором этапе – эффективность адсорбции органических веществ на образовавшихся гидроокисях металлов.*

После продувки смесь сточных вод подщелачивают раствором известкового молока и тщательно перемешивают. При величине  $\text{pH} = 3,5 \div 4,0$  образуются крупные хлопья гидроокиси железа (III) на которых происходит сорбция трудно окисляемых ароматических углеводородов (кислол, толуол), недоокисленных органических примесей (фенол, ацетон) и промежуточных органических веществ (органических кислот), получившихся в процессе окисления.

*– на третьем этапе – процессы коагуляции и соосаждения совместно со сточными водами гальванического производства.*

После подщелачивания и перемешивания смесь сточных вод, содержащих хром и лакокрасочные загрязнения, смешивают с кислотнo-щелочным стоком, подщелачивается известковым молоком и тщательно перемешивается в реакторе нейтрализаторе всех видов стоков для обеспечения благоприятных условий коагуляции. Последний этап нейтрализации краскосодержащих сточных вод – осветлитель. После перемешивания смесь сточных вод отстаивалась в течение 1,5 часа.

Возможность обработки сточных вод содержащей лакокрасочные загрязнения в линии восстановления хрома (VI) до хрома (III) предопределяет тот факт, что большинство органических загрязнений окисляется на  $95 \div 98$  % бихроматами до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Деструкции органических загрязнений способствует и окисление их кислородом воздуха. Дальнейшее снижение содержания органических загрязнителей можно ожидать при сорбции их на оксигидратном коллекторе, образующемся в процессе нейтрализации гальванических стоков. Важным является и тот факт, что при обработке сточных вод, возможно решение проблемы удаления тяжелых металлов, вносимых в сточные воды в процессе нанесения лакокрасочных покрытий.

Учёт перечисленных доводов при выборе данной технологии очистки сточных вод лакокрасочного производства сулит серьезные экономические и экологические выгоды, а также ряд практических преимуществ,

связанных с резким сокращением потребности в энерго– и материалоёмком технологическом оборудовании и соответственно снижением потребности в производственных площадях.

### **Литература**

1. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий: Монография / Е. А. Урецкий ; под ред. С. Е. Березина. – Брест : БрГТУ, 2008. – 320 с.
2. Способ совместной очистки сточных вод лакокрасочных производств и производств защитных покрытий и плат : пат. 12453 Респ. Беларусь / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз ; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – № а 20071107 ; заявл. 11.09.2007 ; опубл. 16.07.2009 / Гос. реестр на изобретение.
3. Урецкий, Е. А. Исследование возможности создания «попутной» технологии обработки сточных вод, загрязнённых лакокрасочными ингредиентами / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз // Вестник БрГТУ. – 2007. – № 2 (44).; Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 71–74.
4. Урецкий, Е. А. Исследования кинетики процессов сорбции органических загрязнений на оксигидратных коллекторах и их агрегирования в смеси краскосодержащих и гальванических стоков / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз // Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2013. – № 2 (80). – С. 54–57.

УДК 628.12

### **Анализ работы напорных и безнапорных станций обезжелезивания воды**

Васильева М. И.  
УП «Минскводоканал»  
Минск, Республика Беларусь

*Рассматриваются вопросы удаления железа из подземных вод на напорных и безнапорных фильтрах, анализ работы напорных и безнапорных фильтров станций обезжелезивания воды.*

На сегодняшний день система водоснабжения города Минска включает в себя 11 основных водозаборов, подающих воду из артезианских источников одна очистная водопроводная станция – поверхностный источник водоснабжения, а также 3 локальных небольших водозабора. Подача качественной питьевой воды осуществляется из 354 артезианских скважин. Протяженность водопроводных сетей в г. Минске составляет 3145,2 км.

Основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения города Минска являются подземные воды, главным недостатком которых является повышенное содержание в них железа. В системе водоснабжения города Минска на 5 водозаборах, в исходной воде содержится повышенная концентрация железа. К ним относятся водозаборы № 2 «Петровщина», № 6 «Острова», № 8 «Вицковщина», № 9 «Водопој» и № 10 «Фелицианово». На станциях обезжелезивания водозаборов № 2 «Петровщина», № 8 «Вицковщина», № 10 «Фелицианово» установлены напорные фильтры, на водозаборах № 6 «Острова» и № 9 «Водопој» – безнапорные (открытые) фильтры.

В подземных водах железо преобладает в виде бикарбоната, сульфида, карбоната, сульфата, а также комплексных соединений с гуматами и фульвокислотами. Из большого количества существующих методов обезжелезивания воды метод упрощённой аэрация с последующим фильтрованием является наиболее оптимальной технологией удаления железа из воды в экономическом и практическом планах. Данный метод обезжелезивания подземных вод применяется на водопроводных станциях УП «Минскводоканал».

Упрощённую аэрацию с последующим фильтрованием допускается применять при следующих показателях качества воды, поступающей на фильтры: содержание общего железа до  $10 \text{ мг/дм}^3$  в том числе двухвалентного железа – не менее 70 % [1].

Все фильтры для обезжелезивания работают по одному принципу — они переводят двухвалентную форму железа в трехвалентную, после чего она удаляется механическим путем.

Обезжелезивание воды на напорных фильтрах с применением метода упрощённой аэрации. Конструктивно напорный фильтр представляет собой цилиндрический сосуд, работающий под давлением. Важнейшими элементами конструкции напорного фильтра являются дренажно-распределительные устройства, состоящие из трубчатой системы и предназначенные для равномерной подачи и сбора воды по всей площади фильтра. До попадания в фильтр вода проходит через статический смеситель, где происходит смешивание (аэрация) воды с воздухом. Затем вода поступает из трубопровода исходной воды на верхнее распределительное устройство, сверху вниз проходит через фильтрующую загрузку, очищенная от примесей фильтрованная вода собирается в нижнем распределительном устройстве и далее поступает в трубопровод очищенной воды.

В зависимости от качества исходной воды применяется широкий ряд фильтрующих материалов: кварцевый песок, Pirolox, Birm, Manganese Greensand, MTM, Filter AG, антрацит [2].

Обезжелезивание воды на безнапорных (открытых) фильтрах с применением метода упрощенной аэрацией. Исходная вода из скважин подается в водосливное устройство (воронку). При изливе воды непосредственно в емкость фильтра происходит насыщение воды кислородом воздуха. Поддержание рабочего уровня воды на фильтре обезжелезивания производится изменением степени открытия затвора на трубопроводе отвода фильтрованной воды. За счет аэрации происходит обогащение воды кислородом, необходимым для окисления ионов двухвалентного железа в трехвалентную форму - гидроокись железа, нерастворимую форму, которая затем задерживается на фильтрующей загрузке. Пройдя фильтрующую загрузку, вода освобождается от гидроокиси железа и поступает в РЧВ.

В качестве загрузки используется кварцевый песок, дробленые горные породы и другие материалы. Для загрузки следует применять тяжелые материалы, так как, только в этом случае, удастся обеспечить разделение в восходящем потоке промывной жидкости хлопьев железа от зерен загрузки [3].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- параметры работы напорных фильтров аналогичны параметрам открытых фильтров;

- в напорных фильтрах, по сравнению с открытыми, обеспечивается более высокая степень очистки воды от железа. Это объясняется более высоким давлением вводимого в фильтры воздуха. Поскольку растворимость газов пропорциональна их давлению над поверхностью жидкости, достигается более высокая растворимость кислорода в воде и больший его избыток в реакции окисления железа;

- напорные фильтры, по сравнению с открытыми более компактны, быстрее монтируются и имеют более качественное исполнение, так как изготавливаются в заводских условиях.

Согласно проектному решению станции обезжелезивания водозабора № 2 «Петровщина» конструкции напорных фильтров, служащие для удаления из воды как двухвалентного, так и трехвалентного железа рассчитывались по содержанию в воде только суммарного железа. В процессе пусконаладочных работ также определялось содержание только суммарного железа после напорных фильтров. Но в процессе эксплуатации установлено, что процессы окисления двухвалентного железа в трехвалентное железо происходят на этапе прохождения воды транзитом по сборным водоводам, что подтверждается лабораторными испытаниями, проведенными на базе станции обезжелезивания водозабора № 2 «Петровщина» по договору с РУП «Научно-производственный центр по геологии».

В результате данных испытаний установлено, что при поступлении воды на сооружения станции обезжелезивания, при фактическом содержании

железа суммарного в пробах воды, присутствие не окисленного железа в воде находится в незначительных концентрациях. Так на участке сборного водовода водозабора № 2 «Петровщина» протяженностью 2095 м максимальное содержание в воде двухвалентного железа составляет  $0,76 \text{ мг/дм}^3$ , при этом на станцию обезжелезивания поступает вода содержанием двухвалентного железа  $< 0,05 \text{ мг/дм}^3$  [4].

Такие же лабораторные испытания проведены и на водозаборе № 9 «Водопой» эксплуатирующем безнапорные фильтры обезжелезивания воды. Так на участке сборного водовода «Северной» группы скважин протяженностью 12600 м максимальное содержание в воде двухвалентного железа составляет  $0,13 \text{ мг/дм}^3$ , при этом на станцию обезжелезивания поступает вода содержанием двухвалентного железа  $< 0,05 \text{ мг/дм}^3$  [4].

На участке сборного водовода «Южной» группы скважин протяженностью 6500 м максимальное содержание в воде двухвалентного железа составляет  $1,42 \text{ мг/дм}^3$ , при этом на станцию обезжелезивания поступает вода содержанием двухвалентного железа  $< 0,05 \text{ мг/дм}^3$

Таким образом, исходя из результатов проведенных испытаний, можно сделать вывод о том, что существующие напорные и безнапорные фильтры станций обезжелезивания воды работают только как скорые фильтры механической очистки, окисление двухвалентного железа происходит уже до поступления воды на сооружения станций обезжелезивания. Данные исследования являются немаловажной составляющей при проведении проектных и пусконаладочных работ напорных и безнапорных фильтров станций обезжелезивания воды, которой пренебрегают.

Для более детального изучения процессов окисления железа в воде при прохождении транзитом по сборным водоводам до станции обезжелезивания и подтверждения полученных результатов лабораторных исследований необходимо проведение дополнительных исследований и изучение данного вопроса.

### Литература

1. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.01-320-2018. (33020) Утвержден и введен в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 67. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь Минск, 2018. – 75с.
2. Беликов, С. Е. Водоподготовка / С. Е. Беликов. – М.: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007. – 241 с.
3. Кулаков, В. В., Обезжелезивание и деманганация подземных вод/ В. В. Кулаков, Е. В. Сошников, Г. П. Чайковский. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 100 с.

**Интенсификация анаэробного сбраживания осадков сточных вод**Иванович В. В.<sup>1</sup>, Марцуль В. Н.<sup>2</sup>, Сапон Е. Г.<sup>2</sup><sup>1</sup>УП «Минскводоканал»<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет»

Минск, Республика Беларусь

*В работе представлены результаты промышленных испытаний вариантов анаэробного сбраживания осадков сточных вод на пилотной экспериментальной установке. Рассматриваются варианты интенсификации стабилизации осадков сточных вод. Представлены результаты расчета энергетического баланса различных вариантов сбраживания.*

Деятельность очистных сооружений канализации неизбежно связана с образованием осадков сточных вод (ОСВ), которые в Республике Беларусь относят к отходам 3 и 4 классов опасности [1]. Несмотря на то, что объем образующихся ОСВ не превышает и 1 % от объема поступающих на очистку сточных вод, затраты на их обработку и удаление могут составлять до 50 % от общей стоимости очистки. Осадки, образующиеся в процессе очистки сточных вод должны подвергаться обработке, обеспечивающей возможность их дальнейшего использования или размещения в соответствии с требованиями законодательства об обращении с отходами [2]. В Беларуси, как правило, такие отходы длительно хранятся на иловых площадках и не подлежат дальнейшему использованию. Вместе с тем ОСВ обладают целым рядом полезных свойств, а именно содержание значительного количества биогенных элементов и высоким энергетическим потенциалом, сравнимым с энергетическим потенциалом торфа.

Одним из наиболее перспективным вариантом использования ОСВ в Республике Беларусь является метод анаэробной стабилизации. Анаэробная стабилизация, также называемая сбраживанием, представляет собой контролируемый непрерывный процесс, в котором органический материал разрушается консорциумом бактерий в отсутствие кислорода. Анаэробное сбраживание приводит к значительному уменьшению объема сухого вещества осадка и образованию биогаза. Основной задачей стабилизации является уменьшение количества болезнетворных микроорганизмов, яиц от паразитов, что делает ОСВ более безопасными в санитарно-гигиеническом отношении. В настоящее время в стране ежедневно образуется порядка 20 тыс. м<sup>3</sup> этих жидких отходов при этом лишь 6 % от этого количества используются с целью получения биогаза. Биогазовые комплексы, обеспечивающие стабилизацию ОСВ, функционируют в Барановичах и Бресте.



Для обоснования проектных решений по анаэробному сбраживанию ОСВ необходимо располагать информацией о основных показателях процесса, учитывающих условия конкретных очистных сооружений канализации. Определение таких показателей возможно при проведении промышленных испытаний с использованием пилотных анаэробных биореакторов, работающих непрерывно в проточном режиме с постоянным контролем в режиме реального времени таких параметров как, температура, выход и состава биогаза, рН, состав жидкой и твердой фаз ОСВ и др.

В рамках рамочного соглашения о сотрудничестве между УП «Минскводоканал», УО «Белорусский государственный технологический университет», компаниями AQUA-Consult Ingenieur GmbH, Cambi и Европейским экологическим центром KREVOX в 2019 году компанией AQUA-Consult Ingenieur GmbH была предоставлена экспериментальная установка контейнерного типа для проведения промышленных испытаний. Работы по проведению испытаний режимов анаэробного сбраживания осуществлялась на базе Минской очистной станции сотрудниками БГТУ совместно со специалистами УП «Минскводоканал». Пилотная установка контейнерного типа включала в себя четыре реактора объемом 80 дм<sup>3</sup> каждый. Каждый реактор был оснащен системами дозирования-выгрузки ОСВ, дозирования щелочи (для корректировки рН), сбора и анализа газа со встроенными автоматическими измерительными устройствами. В ходе проведения испытаний сбраживанию подвергалась смесь сырого осадка и избыточного активного ила, отбиравшаяся в цеху обезвоживания ОСВ. Промышленные испытания проводились в течение девяти месяцев, в результате анаэробной стабилизации подвергнуто более трех тонн ОСВ, выполнено более тысячи лабораторных исследований по различным показателям. В ходе испытаний получена информация о степени сбраживания органического вещества ОСВ Минской очистной станции, суточном выходе биогаза, а также составе жидкой фазы сброженных осадков.

Установлено, что среднее значение степени сбраживания органического вещества ОСВ Минской очистной станции:

- в мезофильном режиме сбраживания, при гидравлическом времени удержания 20 суток, составляет 38,9 %;
- в термофильном режиме сбраживания, при гидравлическом времени удержания 12 суток, составляет 45,2 %.

Ввиду того, что процесс анаэробной стабилизации ОСВ характеризуется малой скоростью все большее внимание уделяется применению методов его интенсификации с целью уменьшения объемов метантенков, повышения выхода биогаза и соответственно энергетической эффективности работы биогазовых комплексов. Среди перспективных направлений интенсификации процесса генерации биогаза выделяют технологий предварительной

обработки ОСВ, повышающие скорость и степень биоразлагаемости органических веществ за счет быстрого перевода их в растворенное состояние. Для предварительной обработки используют термические, ультразвуковые, микроволновые, механические и ферментативные методы. При использовании некоторых процессов также можно добиться хороших результатов в улучшении водоотдающих свойств осадков. Многие из методов все еще находятся на стадии испытаний, однако самые перспективные уже получили коммерческое применение. Наиболее распространенным методом интенсификации стабилизации является термофильный гидролиз (термогидролиз) протекающий при температуре более 100 °С и повышенном давлении. Известно, что при определенных условиях использование термогидролиза позволяет увеличить выход биогаза из ОСВ более чем на 50 % [3].

На основании данных, полученных в результате промышленных испытаний, а также анализа научно-технической литературы, составлены энергетические балансы для четырех вариантов анаэробного сбраживания, как с учетом предварительной обработки, так и без неё:

- сбраживание в мезофильном режиме;
- сбраживание в термофильном режиме;
- двухступенчатое анаэробное сбраживание;
- сбраживание в термофильном режиме с предварительным термогидролизом.

Энергозатраты на анаэробное сбраживание включают затраты электроэнергии и тепловой энергии.

Основными статьями расхода тепловой энергии являются:

- 1) непосредственный подогрев загружаемого осадка до необходимой расчетной температуры;
- 2) возмещение потерь тепла, уходящего через стенки, днище и перекрытие метантенка;
- 3) возмещение потерь тепла, уносимого с уходящими газами.

Основными статьями расхода электрической энергии в расчете учтены:

- 1) перекачка осадка в метантенк;
- 2) перемешивание осадка в метантенке;
- 3) перекачивание осадка в метантенке через теплообменник;
- 4) очистка возвратных потоков после обезвоживания сброженного осадка;
- 5) другие затраты, характерные для каждого конкретного варианта интенсификации анаэробного сбраживания.

В таблице представлены обобщенные данные о количестве свободно располагаемой энергии после сжигания биогаза в когенерационных установках применимо к очистным сооружениям производительностью 510 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Таблица

Количество получаемой энергии при анаэробном сбраживании ОСВ

Вариант	Тепловая, Гкал/сут	Электрическая, тыс. кВт·ч/сут
Термофильный режим	57	99
Мезофильный режим	51	77
Двухступенчатое сбраживание	56	97
Сбраживание с предварительным термогидролизом	78	126

Таким образом, на основании расчетов энергетического баланса было показано, что технология предварительного термогидролиза характеризуется наибольшим количеством получаемой электрической энергии и наименьшим количеством сухого вещества сброженных ОСВ. Следует отметить, что при сравнении вариантов не учитывался ряд статей расхода энергии, к примеру, на очистку отходящих газов, работу вспомогательного оборудования и т.п. Следовательно, абсолютные значения полезной энергии могут быть меньше рассчитанных значений. Тем не менее выявленные тенденции и сравнительные оценки вариантов сохранятся.

Окончательное принятие решения о применении того или иного метода интенсификации анаэробного сбраживания для условий конкретного очистного сооружения должно быть основано на анализе стоимости их жизненных циклов с учетом вариантов последующего использования сброженных ОСВ.

### Литература

1. ОКРБ 021-2019 Общегосударственный классификатор Республики Беларусь. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь. Минск, 2019. – 88 с.
2. Канализация. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования, ТКП 45-4.01-321-2018 (33020) Утверждён и введён в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 67. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 86 с.
3. Храменков, С. В. Повышение эффективности обработки осадка сточных вод с помощью высокотемпературного гидролиза перед сбраживанием / С. В. Храменков [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 10. – С. 55–60.

**Гидротехническое и энергетическое  
строительство, водный транспорт  
и гидравлика**

УДК 364.122.8

**Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» (ГЭСВТГ)  
(к 100-летию кафедры 1920-2020 гг.)**

Качанов И. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В материалах доклада приводятся в краткой форме исторические данные, связанные со столетним юбилеем кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» (ГЭСВТГ). Отмечается, что кафедра ГЭСВТГ является правопреемницей кафедр «Гидротехническое строительство» и «Кораблестроение и гидравлика» (до 1.09.2012 г. кафедра «Гидравлика»), славная история которых начинается с декабря 1920 г.*

Кафедра ГЭСВТГ БНТУ была создана по приказу ректора 9 апреля 2019 г. путем объединения кафедр «Гидротехническое и энергетическое строительство» (ГТиЭС) и «Кораблестроение и гидравлика» (КиГ).

Кафедры ГТиЭС и КиГ под несколько иными названиями, начиная с далекого 1920 года готовили инженеров по производству гидротехнических и гидромелиоративных работ.

Таким образом кафедра ГЭСВТГ, являясь правопреемницей кафедр ГТиЭС и КиГ, с полным на то основанием отмечает 100-летний юбилей в декабре 2020 г.

Обе кафедры с 1920 г. и по настоящее время входили в состав различных факультетов одного и того же вуза (БПИ-БГПА-БНТУ):

- культурно-технического (1920-1933 гг., БПИ);
- торфомелиоративного (1933-1948 гг., БПИ);
- гидротехнического (1948-1961 гг., БПИ);
- гидротехнического и дорожного строительства (1961-1978 гг., БПИ);
- гидротехнического строительства (1978-1986 гг., БПИ);
- энергетического строительства (с 1986 г. по н. вр., БПИ, БГПА, БНТУ).

Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство» (ГТиЭС) (под таким названием кафедра осуществляла свою деятельность с 1988 г. по 2019 г.) является правопреемницей кафедр «Гидротехнические и гидромелиоративные работы» (ГТиГМР, 1920-1933) и «Гидротехнические и гидромелиоративные сооружения» (ГТиГМС, 1933-1988).

За время деятельности на кафедре было подготовлено более 3000 инженеров по водохозяйственному и энергетическому строительству, из них около 200 чел. из стран дальнего и ближнего зарубежья, работающих в различных отраслях народного хозяйства (гидроэнергетика, мелиорация, водный транспорт, энергетическое строительство и т.д.). На кафедре было защищено 6 докторских и 115 кандидатских диссертаций.

В разные годы кафедрой руководили такие известные ученые и педагоги, как д.т.н., проф. Шестопапов О. С. (1933-1939 гг.), д.т.н., проф. Дорошевич М. В. (1939-1944 гг.), д.т.н., проф., академик НАН БССР Винокуров Ф. П. (1944-1954 гг.), к.т.н., доц. Перышкин Г. А. (1954-1964 гг.) к.т.н., доц. Шимко К. И. (1964-1974 гг.), к.т.н. доц., ветеран ВОВ Филиппович И. В. (1974-1988 гг.), к.т.н., доц. Круглов Г. Г. (1988-2013 гг.), д.т.н., проф. Ивашечкин В. В. (2013-2017 гг.), к.т.н. Повколас К. Э. (2017-2018 гг.), к.т.н., доц. Казмирук И. Ч. (2018-2019 гг.).

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика» (2012-2019 гг.) является преемницей кафедры «Гидравлика» (1920-2012 гг.), преобразование которой из общетехнической в выпускающую произошло в связи с открытием подготовки с 1.09.2004 г. инженерных кадров для предприятий водного транспорта.

Кафедра «Гидравлика», а впоследствии «Кораблестроение и гидравлика» (КиГ), всегда занимала передовые позиции по итогам вузовских смотров-конкурсов как в группе общетехнических, так и в группе выпускающих кафедр. Для предприятий водохозяйственного профиля и водного транспорта на кафедре КиГ за период 2009-2019 гг. было подготовлено около 180 специалистов. На кафедре в период с 2002-2019 гг. были защищены 2 докторских и 12 кандидатских диссертаций.

Заведующими кафедрой являлись такие известные педагоги и ученые, как д.т.н., проф. Кудрявцев П. И. (1933-1941 гг.), к.с.-х.н., доц., ветеран ВОВ Ковалев Я. Т. (1945-1967 гг.), к.т.н., доц., ветеран ВОВ, член методкомиссии Минвуза СССР Лазаревич И. Г. (1967-1975 гг.), чл.-корр. Белорусской инженерной академии, к.т.н., доц. Козлов Д. А. (1975-2002 гг.), д.т.н., проф. Качанов И. В. (2002-2019 гг.).

Обе кафедры входили в состав различных факультетов, деканами которых являлись такие известные ученые организаторы вузовской науки и учебного процесса, как Дорошевич М. В., Павловский А. А., Михайлов С. П., Таканаев Р. Ф., Петрович А. Г., Голубев И. А., Синицын Н. В., Богославчик П. М., Ивашечкин В. В. (с 2017 г. по н. вр.).

Подготовка инженерных кадров в настоящее время по объединенной кафедре осуществляется по трем специальностям 1-ой ступени образования:

– «Водохозяйственное строительство» 1-70 04 01 (специализации «Гидротехническое строительство» 1-700401-01 и «Водные пути и порты» 1-70 04 01-02);

– «Строительство ТЭС и АЭС» 1-70 07 01;

– «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» 1-37 03 02.

По 2-ой ступени образования ведется подготовка магистров технических наук по специальностям:

– «Транспорт» 1-37 80 01;

– «Строительство зданий и сооружений» 1-70 80 01.

Кроме этого, на кафедре ведется подготовка аспирантов по специальностям 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология» и 05.23.07 «Гидротехническое строительство», 05.02.09 «Машины и технологии обработки давлением».

Для подготовки инженерных и научных кадров объединенная кафедра ГЭСВТГ располагает материальной базой: крупнейшей в республике уникальной лабораторией гидротехнических сооружений, гидравлическими лабораториями, специализированным кабинетом по атомному энергетическому строительству с макетами сооружений АЭС, современными компьютерными классами, интерактивными досками с проекторами. Лаборатории кафедры приспособлены для моделирования работы всех типов плотин, судородного шлюза, для изучения волновых воздействий на сооружения, работы турбин и насосов. На русловой площадке проводятся крупномасштабные исследовательские работы по открытым потокам. Научным исследованиям традиционно кафедра уделяет большое внимание. В разные годы на русловой площадке моделировались такие известные сооружения, как канал водного слалома и паводковый водосброс на р. Птичь, которые успешно эксплуатируются и поныне, «промывались» водосбросные плотины Гродненской и Полоцкой ГЭС, в широком лотке моделировалось разрушение дамбы на подрабатываемой территории. Лотки и установки в лабораториях используются студентами при проведении учебных занятий, аспирантами и магистрантами – для диссертационных экспериментов, преподавателями – при выполнении как бюджетных, так и договорных исследовательских работ. Коллективом преподавателей кафедры изданы десятки учебников и учебных пособий. Получено около 200 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Все изучаемые студентами дисциплины обеспечены методическими пособиями.

К числу основных научных направлений кафедры можно отнести:

- улучшение эксплуатационных показателей комплексных электростанций;
- способы мелиорации земель с различным рельефом;

- исследования надежности гидроузлов в период паводков;
- гидравлические исследования водосбросных сооружений;
- теоретические и экспериментальные исследования в области импульсной обработки материалов;
- разработка научных основ и технологий комплексного импульсно-виброреагентного воздействия на фильтры и прифильтровую зону водозаборных скважин;
- разработка технологий изготовления биметаллического инструмента;
- разработка методов и оборудования для интенсификации процессов растворения и смешивания низко- и высокомолекулярных веществ;
- гидрологические исследования параметров малых водотоков;
- разработка низконапорных гидросооружений;
- разработка струйных технологий очистки и защиты от коррозии стальных изделий на основе использования бентонитосодержащих рабочих жидкостей;
- численные методы оценки напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений при действии статических и динамических нагрузок;
- повышение надежности и долговечности водозаборных скважин, систем водоснабжения и вертикального дренажа;
- волновые явления в судоходных шлюзах.

С января 2018 г. на кафедре зарегистрирована и действует научная школа в области разработки и создания высокоэнергетических процессов скоростной металлообработки и высоконапорных гидроструйных многофункциональных технологий на основе реверсивных винтовых и двухфазных течений (руководитель проф., д.т.н. И. В. Качанов).

Студенты кафедры активно привлекаются к выполнению научно-исследовательских и хозяйственных работ на кафедре «ГЭСВТГ», принимают активное участие в патентно-изобретательской работе, ежегодно выступают с докладами на СНТК БНТУ, принимают участие в республиканских и международных конкурсах.

25 студентов и магистрантов кафедры в период 2010-2020 гг. награждены премиями Президентского фонда РБ, 10 человек стали Лауреатами международных и республиканских конкурсов НИРС, многие студенты удостоены дипломов «Отличник НИРС» и «Активист НИРС».

По итогам ежегодного смотра-конкурса, проведенного в БНТУ в 2019 г., студенческое научное бюро «Водно-коммунальное хозяйство», (научный руководитель проф., д.т.н. И. В. Качанов) при кафедре ГЭСВТГ было признано лучшим в БНТУ и получило премию Президентского Фонда РБ,



которая была использована на приобретение оборудования и приборов для учебного процесса и научных исследований.

В связи с грядущим 100-летием Совет БНГУ поддержал предложение кафедры ГЭСВТГ о создании на базе учебной лаборатории № 27 именной лаборатории «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика имени Академика Ф. П. Винокурова».

В настоящее время за счет кредитного транша Мирового банка реконструкции и развития решаются практические вопросы по разработке проекта на модернизацию лабораторного оборудования и оснащения его современными цифровыми и автоматизированными системами регистрации переменных параметров (усилий, давлений, скорости, расхода и т.д.) как в именной, так и в остальных лабораториях кафедры ГЭСВТГ.

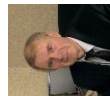
Такой форсированный подход к созданию современной лабораторной и учебной базы позволит обеспечить повышение качества учебного процесса и НИР и создать большую привлекательность наших специальностей для абитуриентов не только РБ, но и ближнего и дальнего зарубежья.

Существенно ускоряет вопрос модернизации нашей лабораторной базы и грядущее увеличение контингента студентов, начиная с 2021 г. Это увеличение произойдет за счет студентов-гидротехников из Узбекистана, для которых по учебному плану предусмотрено двухгодичное обучение по специальным дисциплинам в аудиториях и лабораториях кафедры ГЭСВТГ. С учетом этого обстоятельства должна быть проведена серьезная организационная работа, чтобы качество учебного процесса по всем формам его реализации полностью соответствовало бы требованиям стандарта специальности и международным нормам.

Достижение успеха в решении вышеуказанных текущих и перспективных задач возможно только при наличии крепкого коллектива единомышленников, к числу которых как раз и относится коллектив кафедры ГЭСВТГ, представленный на групповом фото.

Оценивая сегодняшний коллектив кафедры ГЭСВТГ (средний возраст около 50 лет) можно с уверенностью сказать, что он представляет собой сочетание высококвалифицированных ветеранов и молодежи, обладающей прекрасной инженерно-компьютерной подготовкой. Такое сочетание ценного научно-педагогического и жизненного опыта с молодежной энергетикой позволит коллективу кафедры ГЭСВТГ успешно решать самые сложные задачи, которые поставит 21-й век в совсем уже недалёком будущем.

В состав коллектива кафедры ГЭСВТГ входят следующие сотрудники:



к.т.н., проф.  
Богославчик  
П. М.



д.т.н., проф.  
Ивашечкин  
В. В.



заведующий  
кафедрой  
д.т.н., проф.  
Качанов И. В.



к.т.н., доц.  
Богданович  
М. И.



к.т.н., доц.  
Гатиелло  
С. П.



к.т.н., доц.  
Казь-  
мирук И. Ч.



к.т.н., доц.  
Круглов Г. Г.



к.т.н., доц.  
Ключников  
В. А.



к.т.н., доц.  
Кулебякин  
В. В.



к.т.н., доц.  
Курчевский  
С. М.



к.т.н., доц.  
Линкевич  
Н. Н.



к.т.н., доц.  
Недбальский  
В. К.



к.т.н., доц.  
Повколос  
К. Э.



к.т.н., доц.  
Селезнев В. И.



к.т.н., доц.  
Закерничный  
В. И.



старший пре-  
подаватель  
Евдокимов  
В. А.



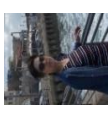
старший пре-  
подаватель  
Власов В. В.



старший пре-  
подаватель  
Кондратович  
А. Н.



старший пре-  
подаватель  
Коревицкий  
Г. А.



старший пре-  
подаватель  
Корбут О. Б.



старший препо-  
даватель  
Недашков-  
ская И. В.



старший препо-  
даватель  
Шаталов И. М.



старший пре-  
подаватель  
Щербакова  
М. К.



ассистент  
Крицкая В. И.



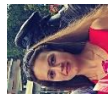
ассистент  
Ленкевич  
С. А.



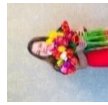
ассистент  
Медведева  
Ю. А.



ассистент  
Немеровец  
О. А.



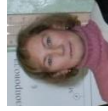
ассистент  
Семенова  
Я. А.



ассистент  
Хвиг'тко  
К. В.



заведующий ла-  
бораторией Бо-  
рисевич А. И.



ведущий ин-  
женер-про-  
граммист  
Михновец  
М. М.



ведущий ин-  
женер Архан-  
гельский С. И.



ведущий ин-  
женер  
Петренко  
А. Н.



ведущий ин-  
женер  
Трофимов  
И. М.



ведущий ин-  
женер  
Янкович И. Н.



инженер  
1 кат.  
Говорушко  
Л. М.



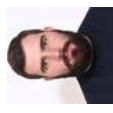
инженер  
Подиев  
Н. Ю.



аспирант  
Ковалевич В. С.



аспирант  
Быков К. Ю.



аспирант  
Кочергин  
А. Ю.

Коллектив кафедры ГЭСВТГ накануне своего 100-летнего юбилея (1920-2020 гг.)

## **Моделирование динамики берегов и устойчивости креплений откосов в гидротехнической лаборатории БНТУ**

Левкевич В. Е.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

*Лабораторные исследования, связанные с моделированием волновых и русловых процессов, могут выполняться только при наличии достаточной лабораторной базы, каковой и является одна из первых в Беларуси и практически на сегодняшний день единственная в стране гидротехническая лаборатория факультета энергетического строительства БНТУ. В настоящей работе изложен краткий исторический очерк становления и существования этой нужной для страны лабораторной базы.*

Исторически сложилось, что ВУЗовскую водохозяйственную науку в Беларуси возглавляет «альма-матер» белорусских гидротехников – Белорусский политехнический институт (БПИ), позже названный в период перестройки БГПА – Белорусской государственной политехнической академией, а с 2002 года ставший главным техническим ВУЗом страны БНТУ – Белорусским национальным техническим университетом. Из этого университета вышла целая плеяда известных ученых гидротехников, возглавивших ключевые направления исследований в водохозяйственной сфере и области водохозяйственного и мелиоративного проектирования и строительства.

Формирование водохозяйственной отрасли страны в конце XX века потребовало решения ряда фундаментальных и прикладных научных задач и сложных водохозяйственных проблем. Учитывая сложившуюся ситуацию, связанную с решением водохозяйственных проблем и проблем в области мелиорации, в БПИ была создана кафедра гидротехнических сооружений и учебная гидротехническая лаборатория, которые позволяла проводить прикладные натурные и лабораторные исследования, связанные с оценкой и прогнозом деформаций, с устойчивостью русел естественных водотоков и искусственных каналов, а также инженерной защитой территорий и мелиорацией земель.

Научное направление, связанное с динамикой береговых процессов и берегозащитой, на кафедре гидротехнических сооружений возглавил кандидат технических наук, доцент Е. М. Левкевич. Руководили кафедрой в различные годы исследований К. И. Шимко, И. В. Филиппович, Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин (рис. 1).



Рис. 1. Заведующие кафедрой гидротехнического строительства

Учебная лаборатория при кафедре гидротехнических сооружений, созданная в конце 50-х годов XX века, была полностью сохранена в период развала Союза, перестройки и сейчас является одной из немногих, где возможно проведение моделирования и исследования волновых, фильтрационных и русловых процессов. Уникальность этой лаборатории заключается в том, что в конце 50-х годов XX века при ее создании по инициативе к.т.н. Е. М. Левкевича были установлены два волновых лотка (большой и малый), позволяющие моделировать воздействие волнового и урванного режимов на устойчивость откосов и их креплений (рис. 2).



Рис. 2. Оборудование гидротехнической лаборатории, расположенной в корпусе № 1 БНТУ

В стенах гидротехнической лаборатории БНТУ на основе экспериментов в волновых лотках были защищены диссертации к.т.н. Е. М. Левкевича,

к.т.н. В. Н. Юхновца, к.т.н. Н. В. Сурмы, к.т.н. П. М. Богославчика, а также д.т.н. В. Е. Левкевича и учеников последнего – к.т.н. С. М. Пастухова, к.т.н. В. В. Кобьяка, магистра А. В. Бузука, к.т.н. А. С. Микановича (рис. 3). На волновых установках свои исследования проводили также Г. П. Сапожников, Т. Н. Козлова, Силла Мамади.



Рис. 3. Преподаватели, защитившие диссертации на основе данных, полученных в волновых лотках гидротехнической лаборатории

В начале 70-х годов XX века возникла потребность и практическая необходимость в исследовании устойчивости верховых грунтовых откосов сооружений рыбоводных прудов, а также берегозащиты путем использования различного типа волноломов и креплений биологического типа. Для решения поставленной задачи во внутреннем дворе главного корпуса БНТУ рядом с лабораторией и русловой площадкой был построен уникальный (даже для масштабов СССР) волновой бассейн, позволяющий моделировать деформации откосов в условиях, практически приближенных к натурным. Размеры волнового бассейна составляли 25,0 x 6,0 x 1,50 м. Такие габариты экспериментальной установки при глубине наполнения до 1,0 м позволяли генерировать волны высотой до 30 см и длиной до 3,0 м, т.е. воспроизводить реальные параметры ветрового волнения, наблюдаемого в натуральных условиях водохранилищ страны. Волнение генерировалось с помощью уникального, созданного в БПИ для бассейна, волнопродуктора с электроприводом. Моделирование как волновых, так и береговых процессов выполнялось фактически без искажения масштабов с последующим переносом полученных результатов экспериментов в натурные условия и проектные решения. Основным потребителем «услуг» лаборатории являлись проектные институты республики «Белгипроводхоз» (г. Минск), «Союзгипромелиоводхоз» (г. Пинск), Минводхозы СССР и БССР, а также Министерство рыбного хозяйства, Министерство речного транспорта, Минэнерго и др. К сожалению, после 70-х годов XX-го века уникальная волновая установка была демонтирована. Созданная лабораторная база требовала наличия высокоточного

измерительного и регистрирующего оборудования, позволяющего получать достоверные репрезентативные результаты. Деловые контакты Левкевича Е. М. и консультации специалистов института океанологии Академии наук СССР, а именно, профессоров В. П. Зенковича и В. В. Лонгинова, позволили разработать приборно-измерительный комплекс, в состав которого вошли оригинальные датчики давления и скорости волнового потока (рис. 4) и регистрирующее оборудование с пишущим многоканальным осциллографом. Комплекс представлял БПИ на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства (ВДНХ), где и был отмечен серебряной медалью (рис. 5).



Рис. 4. Разработанные датчики давления и скорости



Рис. 5. Электроволномер БПИ-2, представленный на ВДНХ СССР

Бурное развитие малой гидроэнергетики, строительство рыбоводных комплексов в республике, реконструкция береговой линии ряда водохранилищ, строительство Вилейско-Минской водной системы с каскадом гидроузлов, трассы водного слалома и второго водовыпуска из Заславского водохранилища явилось основой для проведения кафедрой ГТС большого объема как лабораторных, так и натурных полевых исследований. Натурные

исследования являлись базой и первоосновой для лабораторных экспериментов. Много лет в состав экспедиций входил транспорт автобазы БПИ (БНТУ) – это автомобиль ГАЗ-69 и специально выполненный под заказ для нужд кафедры экспедиционный автобус марки РАФ (рис. 6).



Рис. 6. Экспедиционный транспорт гидротехнической лаборатории

Первые полевые натурные исследования захватывали период ввода в эксплуатацию Лепельского, Осиповичского и Заславского водохранилищ, созданных для целей гидроэнергетики.

Начало исследований было положено в 1956-1959 годах и включало обследование всей береговой линии водоемов, создание сети стационарных наблюдений за динамикой береговых процессов на основе единых всесоюзных норм.

В этот же период устанавливаются творческие связи кафедры с «береговиками» всего Советского союза. Об исследованиях БПИ в области динамики береговых процессов пишут в печати и научных изданиях, а сотрудники кафедры становятся участниками многочисленных Международных конференций, симпозиумов и совещаний.

В настоящее время в обновленной и реконструируемой гидротехнической лаборатории проводятся комплексные исследования по оценке устойчивости подпорных грунтовых сооружений и креплений откосов на проектируемых и существующих гидроузлах Беларуси.



## О строительстве малых ГЭС в Беларуси

Смирнов А. И.<sup>1</sup>, Гатилло С. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПО «Малая энергетика»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В данной работе приводятся данные об реконструированных ранее построенных и вновь сооруженных в Беларуси за последние десять лет малых ГЭС. Анализируются некоторые особенности нового этапа развития гидроэнергетики в стране.*

Строительство малых ГЭС в Беларуси имеет большую историю. Сейчас идет уже третий этап развития малой гидроэнергетики в стране, который начался на рубеже 80-х и 90-х годов прошлого столетия. Первые два этапа проходили в 20-30 годах и в 40-50 годах, что подробно было рассмотрено в ряде работ, выполненных в конце второго этапа [1, 2].

В этих работах указано, что к концу второго этапа в 1960 году в эксплуатации было свыше 170 действующих ГЭС общей мощностью около 15 тыс.кВт, что составляло менее 1 % суммарной мощности всех энергоисточников страны, но в основном они работали на выделенную нагрузку.

Постепенно до конца 80-х годов почти все они были выведены из эксплуатации, в системе Министерства энергетики оставалось в работе только четыре ГЭС [3].

Необходимость и закономерность возникновения нового третьего этапа были обусловлены такими причинами, как удорожание традиционных энергоресурсов, экологическая эффективность гидроэнергетических ресурсов, а также новейшие наработки в области автоматизации и средств управления, позволяющие обеспечить их полную автоматизацию и существенно сократить эксплуатационные затраты [3]. В этой же работе изложены результаты развития гидроэнергетики Беларуси за первые двадцать лет третьего этапа (1990-2010 годы). За указанные годы в Беларуси было восстановлено, отремонтировано и построено порядка 40 малых ГЭС, при этом в основном упор делался именно на восстановление старых ГЭС и строительство новых путем пристройки к существующему напорному фронту. Очень часто проводилось восстановление и ремонт старых гидротурбин и другого гидромеханического оборудования.

Объекты, введенные в эксплуатацию за очередные десять лет (2011-2020 годы) третьего этапа строительства ГЭС, приведены в таблице.

Таблица

## Восстановленные и вновь построенные ГЭС Беларуси (2011-2020 годы)

Название ГЭС	Год строительства	Установленная мощность, кВт	Организация – балансодержатель и генеральный проектировщик	Характеристика работ
1	2	3	4	5
Дрозды	2011	300	«Минскводоканал» «Малая энергетика»	Новое строительство
Залузье	2011	180	«Днепро-Бугский водный путь»	Новое строительство
Новосады	2012	190	«Днепро-Бугский водный путь»	Новое строительство
Александрия	2012	55	СПК «Александрийское» «Малая энергетика»	Новое строительство
Гродненская ГЭС	2012	17 000	«Гродноэнерго» «Белнипиэнергопром»	Новое строительство
ГЭС на Минской станции азрации	2013	500	«Минскводоканал» «Малая энергетика»	Новое строительство
МГЭС на водосбросе карьера «Гралево»	2013	700	«ГидроЭнерго-Инвест»	Новое строительство
Богинская ГЭС	2015	320	«Витебскэнерго»	Новое строительство
Стахово (1 оч.)	2015	346	«Днепро-Бугский водный путь»	Новое строительство
Стахово (2 оч.)	2016	346	«Днепро-Бугский водный путь»	Новое строительство
МГЭС на вдхр. Верхнее, д. Коробчицы	2016	44	«Гродножилстрой» «Малая энергетика»	Новое строительство
МГЭС на р. Исса, г. Слоним	2017	200	«ГидроПарк»	Новое строительство
Полоцкая ГЭС	2017	21 600	«Витебскэнерго» «Белнипиэнергопром»	Новое строительство
Витебская ГЭС	2017	40 000	«Витебскэнерго» «Белнипиэнергопром»	Новое строительство
Зельвенская ГЭС	2019	100	«Гродноэнерго»	Реконструкция

			«Белнипиэнерго-пром»	
МГЭС на р. Мнюта, д. Городец	2020	160	«ГидроПарк»	Новое строительство

Эти очередные десять лет третьего этапа характеризуется иным подходом к выбору основного оборудования и компоновки ГЭС. Более широко применяются новые разработки конструкций гидроагрегатов европейских фирм – производителей оборудования. Построены малые ГЭС на двух технических водовыпусках.

Построены три довольно мощные для условий Беларуси многомегаваттные ГЭС на реках Неман и Западная Двина. На ряде водотоков (Западной Двине, Свислочи, Днепро-Бугском водном пути) построено несколько ГЭС, образовавших каскад.

Появилось несколько ГЭС, построенных фирмами с частным капиталом, что произошло благодаря благоприятствующему законодательству в области возобновляемой энергетики.

Следует отметить, что в связи с вводом в нашей стране в ближайшее время в эксплуатацию атомной электростанции роль ГЭС в балансе электроэнергии не только не уменьшается, а наоборот, увеличивается. Это объясняется наилучшими возможностями ГЭС по сравнению с другими энергоисточниками в текущем регулировании объема генерируемой электроэнергии за счет достаточно широких возможностей аккумулирования воды, как первичного энергоносителя, в водохранилищах, быстрого включения и отключения оборудования.

Возможно, что в ближайшем будущем будет также рассмотрен вопрос сооружения гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС), актуальность строительства которой в совокупности с АЭС очень велика.

Как свидетельствуют данные таблицы, наибольшее внимание развитию гидроэнергетики на своих объектах уделяли такие организации, как УП «Минскводоканал» и РУЭСП «Днепро-Бугский водный путь».

В настоящее время в Республике Беларусь работает 52 гидроэлектростанции общей мощностью около 95,5 тыс. кВт. Они все подключены к энергосистеме страны и вносят свою лепту в снабжение ее «зеленой» энергией.

Большой вклад в инициацию и реализацию в нашей республике текущего третьего этапа проектирования и строительства малых ГЭС, а также в проектирование крупнейших ГЭС внесли кафедра гидротехнического и энергетического строительства БНТУ, подготовившая подавляющее количество специалистов-гидротехников, а также такие организации, как РУП «Белнипиэнергопром», НПО «Малая энергетика», РУП «Белгипроводхоз» и РУЭСП «Днепро-Бугский водный путь».

Третий этап строительства гидроэлектростанций еще не завершен. Для будущих ГЭС намечено несколько створов на Западной Двине, Днепре, а также на притоках Немана и Западной Двины. При полной реализации этих проектов суммарная мощность всех ГЭС Беларуси может быть увеличена на 25-40 %.

### Литература

1. Гидроэнергетические ресурсы Белоруссии / ред. М. Г. Мурашко, П. Д. Гатилло. – Минск: Изд. АН БССР, 1957. – 174 с.
2. Водноэнергетический кадастр Белорусской ССР: в 2-х т./ М. Г. Мурашко [и др.]. – Минск: Изд. АН БССР, 1960. – Т. 1. – 282 с.
3. Смирнов, А. И., Гатилло, С. П. Новый этап восстановления и строительства малых ГЭС в Беларуси // Водное хозяйство и гидротехническое строительство: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск: Изд. БНТУ. – Вып. 22. – С. 31–35.

УДК 626.4

### Защита ворот шлюзов от навала судов

Моргунов К. П., Колосов М. А.

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С. О. Макарова»  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Представлен вариант защиты ворот шлюза от навала судна, использующий в качестве тормозного устройства тележки, перемещающиеся по наклонным путям, расположенным на стенах камеры шлюза.*

Практика эксплуатации судоходных шлюзов выявила наиболее вероятные и наиболее опасные события – разрушение ворот шлюза при наполнении камеры. Такое событие может привести не только к разрушению ворот, но и к повреждению судна, к сработке призмы воды в камере шлюза, а иногда и к полной сработке верхнего бьефа. Причины навала – как правило, ошибки судоводителей в оценке режима движения судна. Поскольку исключить человеческий фактор в нарушении режимов движения невозможно, на шлюзах предполагается защита конструкций ворот от навалов.

Известно [1], что с увеличением числа шлюзований возрастает и число навалов на ворота (рис. 1). Такие зависимости установлены для шлюзов Волго-Балтийского водного пути, шлюзов канала имени Москвы и других бассейнов.

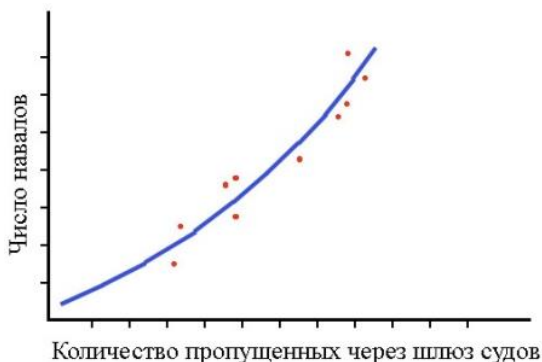


Рис. 1. Условная зависимость числа навалов судна на ворота от количества судопропусков в навигацию

Каждый навал на ворота приводит к большим или малым повреждениям ворот, но почти всегда – к остановке судопропуска. Так, навал на ворота верхней камеры шестикамерного Пермского шлюза (1994 год, река Кама) привел к полному разрушению пролетного строения ворот, разрушению бетона пазовых конструкций, а затем к разрушению ворот нижележащих камер. Их разрушение было вызвано потоком воды и ударами судов, движущихся вместе с потоком, по шлюзовым ступеням. Ремонт Пермских шлюзов потребовал проведения работ в течение 20 лет.

Разрушение ворот Константиновского шлюза (2004 год, река Дон) привело к перерыву судопропуска по Волго-Донскому водному пути на 18 суток.

Ежегодно происходят навалы, которые вызывают разрушение верхнего ригеля ворот, механизмов открытия и закрытия ворот, пешеходных мостков. Такие повреждения требуют ремонта, перерыв судопропуска занимает от нескольких часов до нескольких суток.

Для защиты ворот от повреждения предлагаются различные типы защитных устройств. Защита ворот от навала предполагает создание устройств, способных остановить судно перед воротами, для чего необходимо приложить к судну тормозное воздействие, обеспечивающее гашение энергии движения судна. Уравнение остановки судна перед воротами имеет вид

$$\frac{W v^2}{2} P = F_T l_T,$$

где  $W$  – водоизмещение судна, т;  $v$  – скорость движения судна в момент навала, м/с;  $P$  – коэффициент присоединенной массы воды (по данным исследования на шлюзах  $P = 1, 1,1-1,15$ );  $F_T$  – тормозное усилие предохранительных устройств, т;  $l_T$  – путь торможения, м.

Разработки предохранительных устройств направлены на создание эффективной системы торможения, которая должна обеспечивать при усилии  $F_T$  остановку судна перед воротами на участке пути  $l_T$ .

Анализ существующих схем защитных устройств показал, что они обычно имеют два элемента:

- поперечный канат (цепь), перекинутый через камеру шлюза;
- тормозные системы, соединенные с канатом.

В качестве тормозных систем используются устройства с применением противовесов в виде грузов, расположенных в вертикальных шахтах, гидроцилиндров с системой перетока масла из штоковой полости, резиновых блоков, сформированных в цепи, тормозных фрикционных тележек. Некоторые системы торможения (гидроцилиндры) уже работают на действующих шлюзах (Волго-Дон).

Недостатком известных систем защиты ворот является короткий путь торможения, обусловленный для гидроцилиндров и резиновых блоков ограниченностью их размеров, для противовесов – ограниченностью глубины шахт. Кроме того, все известные системы имеют несовершенное регулирование усилий.

Нами разработана система торможения, которая состоит из поперечного каната, концы которого закреплены на тележках, установленных на наклонных путях, проложенных по стенам камеры (рис. 2).

Поперечный канат в зоне его контакта с форштевнем судна должен иметь резиновую оболочку, компенсирующую трение, возникающее при навале судна (рис. 3). Сила трения  $T$  между форштевнем судна и канатом защитного устройства определяется формулой

$$T = \mu F_T \cos \alpha,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения резиновой оболочки каната о металлический брус форштевня;  $\alpha$  – угол наклона форштевня судна.

По нашим оценкам  $\mu = 0,85-0,90$ . Задаваясь углом уклона путей тележки  $\beta$ , получим выражение для подъемной силы, действующей на форштевень

$$Q = F_T \sin \beta.$$

Необходимым условием устойчивости каната на форштевне судна является  $T \geq Q$ . Тогда для обеспечения торможения необходимо задаться, например, следующим значением коэффициента устойчивости

$$K_y = \frac{T}{Q} = \frac{\mu F_T \cos \alpha}{F_T \sin \beta} = \frac{\mu \cos \alpha}{\sin \beta} \geq 1,5.$$

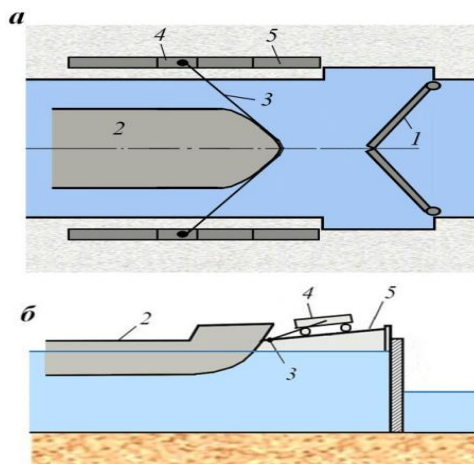


Рис. 2. Схема предохранительного устройства:  
*a* – план, *б* – продольный разрез;  
 1 – ворота шлюза, 2 – судно в камере, 3 – гибкое заграждение,  
 4 – тележка, 5 – наклонные пути тележки

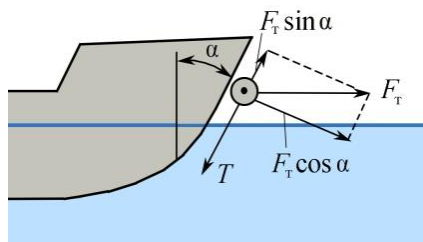


Рис. 3. Схема взаимодействия тормозного каната с форштевнем судна

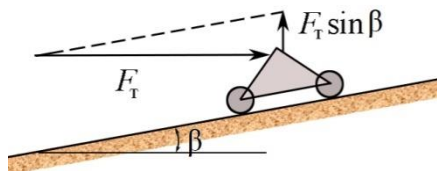


Рис. 4. Схема усилий на тормозной тележке

Из этого условия, зная коэффициент трения  $\mu$  и угол наклона форштевня судна  $\alpha$ , можно определить угол уклона тормозных путей тележки.

Выводы:

- представленная схема взаимодействия тормозного каната и форштевня судна может быть уточнена с учетом фактических обводов судна и типа резины, принятой для оболочки каната.
- усилия навала следует задавать в зависимости от принятой длины зоны безопасности перед воротами шлюза.
- так как тормозные тележки воспринимают как горизонтальные, так и вертикальные нагрузки, наклонные пути необходимо проектировать, используя лотковую форму фундамента.

### Литература

1. Нычик, Т. Ю. Анализ аварийных ситуаций при шлюзовании судов / Журнал Государственного университета водных коммуникаций. – СПб.: Изд-во СПГУВК, 2011, вып. IV (XII). – С. 105–112.

УДК 624.124.791

### Новые направления моделирования ледяного покрова с применением композитного модельного льда GP-ice

Зуев В. А., Двойченко Ю. А., Себин А. С.

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия

*Активное использование большого количества весьма разнообразных способов моделирования ледяного покрова для оценки ледовых качеств судов в различных ледовых опытовых бассейнах свидетельствует об отсутствии единого подхода в этом вопросе. В данной статье указывается на фундаментальное противоречие, лежащее в основе упомянутых методов, и предлагается новый способ тестирования модельного ледяного поля, основанный*



*на рассмотрении фактического процесса разрушения льда. Предлагается методика использования композитного модельного льда GP-ice, показывается, что механические свойства модельного ледяного поля лежат в области значений, требуемых для обеспечения условий моделирования. Представлены результаты экспериментальных исследований, намечены направления дальнейшей работы.*

Исследование сопротивления движению судов во льдах является сложной и нетривиальной задачей, представляющей большой интерес для исследователей. Например, в [6] приведено 17 наиболее известных методов оценки ледового сопротивления ледоколов, однако ни один из них не может с достаточной для практики точностью предсказать скорость движения судна во льдах заданной толщины. Причинами этого являются: сложная совокупность различных по природе и характеру сил, действующих при взаимодействии корпуса судна со льдом и водой, достаточно трудная для математического описания форма судовой поверхности, но, по-видимому, наибольший вклад вносит недостаточная изученность процессов разрушения ледяного покрова как особой природной конструкции, а также свойств льда как специфического материала. Всё это определяет ведущую значимость роли модельного физического эксперимента в задаче прогнозирования ледовой ходкости судов.

Современные представления о ледовом сопротивлении судна [6] основаны на гипотезе о суперпозиции – разделении полного сопротивления судна во льдах на различные составляющие, не зависящие (или пренебрежимо слабо зависящие) друг от друга:

$$R = R_p + R_{obl} + R_g, \quad (1)$$

где  $R_p$  – сопротивление от разрушения ледяного покрова;  $R_{obl}$  – сопротивление, вызванное взаимодействием корпуса судна с обломками, образовавшимися после разрушения ледяного покрова;  $R_g$  – сопротивление воды движению судна.

На этом принципе основан, например, оригинальный способ определения ледового сопротивления [3]. В нём сопротивление от разрушения определяется путём проведения модельного эксперимента в сплошном естественном льду, который имеет прочностные свойства подобные натурному льду, но не имеет подобия по толщине. Затем модель прогоняют в полученных обломках льда и из найденного значения вычитают сопротивление в получившихся обломках льда (которые не подобны натурным). После этого проводят дополнительный эксперимент в плитках из полиэтилена [3] с целью определения  $R_{obl}$ . Сопротивление  $R_g$  определяют путём проведения классического эксперимента в бассейне без льда («на чистой воде»). Данный метод ничем не

уступает известным, имеет хорошую сходимость с натурными данными [10], а также является наиболее строго обоснованным из существующих.

Однако, данная методика является очень трудоёмкой, обладает значительным рядом условностей и допущений, не имеет достаточно обоснованной технологии тестирования на адекватность натуре, не позволяет совместно моделировать составляющие сопротивления (1). С целью преодоления перечисленных недостатков авторами проводится исследование, заключающееся в поиске новых направлений в моделировании ледяного покрова, одним из которых является разработка композитного материала модели льда (GP-ice).

Наиболее существенным недостатком современных физических моделей взаимодействия объектов ледотехники с ледяным покровом является некачественное обеспечение подобия процессов, приводящих к разрушению льда. Одна из причин такого положения состоит в недостаточной изученности разрушения натурального льда, малом количестве проведённых экспериментальных работ. Наиболее значимыми являются исследования [2, 9], дающие достаточно полное представление о процессе разрушения натурального льда, которое явилось продолжением экспериментов российских ученых [7, 8, 9]. Главное отличие опытов, приведённых в работе [5], от упомянутых состояло в использовании кинематического метода нагружения льда. Если ранее (силовой метод) производилось постоянное увеличение нагрузки вплоть до пролома с фиксацией проломной нагрузки [7, 8], регистрацией прогиба на момент пролома [8], то при кинематическом нагружении прогиб под нагрузкой задавался ее перемещением и фиксировалась силовая реакция ледяного покрова на данное перемещение. Это позволило получать детальную и полную характеристику процесса в виде диаграммы разрушения, на которой отображаются моменты спада нагрузки до и после достижения ей максимума.

Кроме этого, упомянутые ранние опыты производились по схеме «центральное нагружение», когда усилие прикладывается к бесконечному ледяному покрову. В последних опытах [5] разрушение производилось по схемам наиболее приближенным к реальному воздействию технических средств и сооружений на ледяной покров – по схеме прокладки канала и расширению его кромок.

При приложении вертикального усилия к бесконечному ледяному покрову происходит его деформация. Когда напряжения во льду достигают критических значений, происходит образование сети трещин – сначала радиальных, затем кольцевых. В этот момент ледяной покров, разделённый трещинами, теряет свою сплошность, но разрушения не происходит. При дальнейшем увеличении нагрузки лёд деформируется как конструкция, состоящая из отдельных блоков. Пролом ледяного покрова происходит в тот момент, когда блоки, опёртые друг на друга, разрушаются по краям от

взаимодействия друг с другом и конструкция в целом теряет свою несущую способность [2]. В этот момент происходит образование значительного числа трещин, описанию которых встречается большие трудности ввиду большого их количества.

Принимая во внимания описанный процесс разрушения ледяного покрова, становится очевидной несостоятельность методики тестирования на адекватность большей части современных физических моделей льда. Этот тест представляет собой облом консольной балки, выпиленной во льду. В результате такого опыта максимальное значение приложенной ко льду нагрузки фиксируется в тот момент, когда возникает трещина и балка отделяется от остального льда, тогда как натуральный ледяной покров сохраняет свою несущую способность ещё долгое время после появления первых трещин.

Попытки математического описания, приведённые выше, феноменологии процесса разрушения ледяного покрова встречают значительные трудности. Это обстоятельство затрудняет составление строгих критериев физического моделирования как на основе математических уравнений, так и на основе понимания физики разрушения ввиду сложности процессов, протекающих во льду.

Однако, в экспериментальных исследованиях по разрушению натурального ледяного покрова [7, 9], в том числе и в [5], замечен факт пропорциональности максимального разрушающего лёд усилия квадрату толщины льда, хорошо аппроксимирующая результаты экспериментов по схеме «центрального пролома»:

$$P = k_p h_l^2, \quad (2)$$

где  $P$  – величина сосредоточенного усилия, прикладываемого к ледяному покрову;  $k_p$  – размерный коэффициент (Па), называемый «коэффициентом разрушения», связывает величину приложенного ко льду усилия с толщиной ледяного покрова.

Величина этого коэффициента оказалась достаточно стабильной (средне-квадратичные отклонения от среднего составили не более 10 %) и для схемы центрального пролома составила 1,96 МПа. Этот факт даёт возможность выделить эмпирическое условие моделирования прочности ледяного покрова, учитывая всю сложность процесса разрушения, на основе данных натурального эксперимента.

При проведении экспериментов по определению ледовой ходкости судов [6] геометрические размеры модели  $l_m$  уменьшают в  $\lambda$  раз по сравнению с натурными  $l_n$ :

$$\frac{l_n}{l_m} = \lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – геометрический масштаб моделирования.

Этому же правилу должны подчиняться в том числе и размеры ледяного покрова ( $h_n$ ) при моделировании:

$$\frac{(h_n)_n}{(h_n)_m} = \lambda \quad (4)$$

Испытания моделей судов проводят в пресной воде, а разницей плотностей природы и модели пренебрегают:

$$\rho_m = \rho_n \quad (5)$$

При этом для совместного моделирования массовых сил воды и льда стремятся, чтобы для плотности модельного и натурального льда условие (4) также выполнялось.

Тогда по условиям моделирования все силы, связанные с ускорением свободного падения (силы тяжести, силы поддержания и т.д.), уменьшаются в  $\lambda^3$  раз, т.к.  $g = const$  для природы и для модели. Учитывая (3) и (5), получим:

$$\frac{G_n}{G_m} = \frac{\rho_n V_n g}{\rho_m V_m g} = \lambda^3 \quad (6)$$

Необходимость совместного моделирования механических и массовых сил в рамках одной системы требует соблюдения одинакового для них масштаба моделирования [11] (его ещё называют условием динамического подобия объектов):

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{\rho_n V_n a_n}{\rho_m V_m a_m} = \lambda^3 \quad (7)$$

При проведении модельных испытаний судов на этот масштаб уменьшаются все силы механического характера, связанные с ледовым сопротивлением: силы взаимодействия обломков с судном и между собой, гидродинамические силы, связанные со льдом и судном, сила, действующая со стороны судна на ледяной покров.

Таким образом, для моделирования процесса взаимодействия судов со льдом необходимо подобрать такой материал модели льда, чтобы прикладываемые к ледяному покрову силы, вызванные перемещением судна, разрушали его в тот момент, когда они достигнут величины в  $\lambda^3$  меньшей, чем разрушающая нагрузка в натуре.

Очевидно, что это же правило должно выполняться для модельного ледяного покрова не только при взаимодействии с судном, но и с любой другой приложенной к нему механической силой и она тоже будет в  $\lambda^3$  раз меньше, чем в натуре для этой же схемы нагружения.

В связи с этим выдвигается следующее положение, основополагающее для моделирования ледяного покрова:

«Тестирование модельного ледяного покрова на предмет адекватности модели натуре должно производиться на основе опыта по пролому модельного льда по схеме центрального нагружения».

Тогда, учитывая формулу (3), основанную на данных, полученных при проведении экспериментов по разрушению натурального льда по схеме «центральный пролом», получим:

$$\lambda^3 = \frac{P_n}{P_m} = \frac{(k_p h_n^2)_n}{(k_p h_m^2)_m} \quad (8)$$

Учитывая (4), имеем требование к материалу модели ледяного покрова:

$$(k_p)_m = \frac{(k_p)_n}{\lambda} \quad (9)$$

Аналогичным образом можно показать, что для обеспечения условия моделирования прогиба под силой на момент пролома необходимо, чтобы модуль упругости модельного льда был в  $\lambda$  раз меньше, чем у натурального:

$$E_m = \frac{E_n}{\lambda} \quad (10)$$

Направления поиска материала, соответствующего условиям (9) и (10), были заложены в НГТУ им. Р.Е. Алексеева патентом [1]. В нем предлагалась модель ледяного покрова, в которой в естественный лед вмораживались полиэтиленовые гранулы, в связи с чем она получила название композитной. Включение гранул в естественный лед приводило к уменьшению его прочности из-за нарушения длинных и крупных межкристаллических связей и малой адгезией льда к полиэтилену. Кроме этого, полиэтилен имеет меньший модуль упругости и его присутствие снижает значение общего модуля деформации ледяного покрова. В совокупности это позволяло надеяться на разработку методики, позволяющей прийти к выполнению условий (9) и (10). Обобщение круга работ, посвященных этой модели, в тот период времени приведено в [3, 6].

Трудоемкость экспериментов с композитным льдом, проводимых в опытовом бассейне в условиях естественного холода на открытом воздухе, зависимость от нестабильных погодных условий, обусловили малое количество опытов. Это не позволило провести достаточно объемное исследование композитного модельного льда и завершить его в полном объеме. Положение изменилось с появлением малого ледового бассейна, расположенного в термокамере [4]. Независимость от внешних условий и снижение трудоемкости позволило вновь проводить эксперименты по изучению свойств композитного льда и поиску направлений для выполнения условий моделирования.

Эксперименты проводились в ледовом бассейне с размерами 1,1×2,5 м, использовались сферические гранулы диаметром 20 мм. Температура в камере поддерживалась  $-15^0 \dots -18^0 \text{C}$ , время намораживания нужного слоя

зависело от начальной температуры воды и составляло 1–5 ч. Разрушенный модельный лед после опыта вместе с гранулами расплавлялся в воде, а в бассейн засыпалась новая порция гранул, предварительно охлажденных в камере. Это сокращало время между опытами.

Внешний вид моделированного льда показан на рис. 1, *а*. Геометрические параметры этого льда даны на рис. 1, *б*. Толщина промораживаемого слоя гранул естественным льдом  $h_1$  определяет приведенную толщину модельного льда  $h$ :

$$h = \frac{V_D + V_{h_1}}{S} \quad (11)$$

где  $V_D$  – объем сферических гранул на площади  $S$ ;  $V_{h_1}$  – объем льда между гранулами на площади  $S$ .

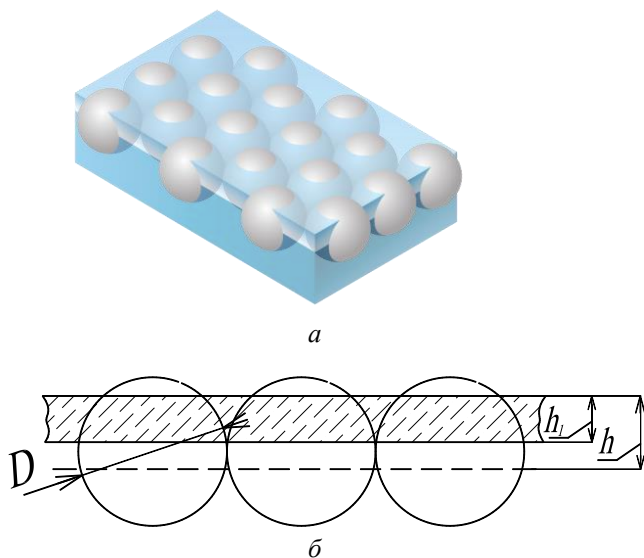


Рис. 1. Однослойная композитная модель ледяного покрова GP-ice с применением гранул  $D = 20$  мм:  
*а* – внешний вид, *б* – геометрические параметры  $h_1$  – глубина проморозки,  
 $h$  – приведенная толщина моделированного льда

В процессе проведения опытов по разрушению модельного льда, показанного на рис. 2, нагружение производилось с применением кинематической схемы – силовонагружатель перемещал упор в лед с постоянной скоростью 1 мм/с. Возникающее усилие измерялось с помощью тензометричес-

кого датчика и регистрировалось посредством АЦП на ПК, перемещение фиксировалось при помощи датчика резистивного типа.

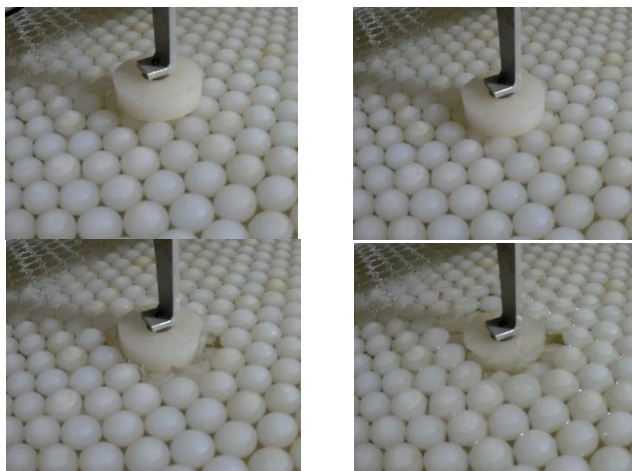


Рис. 2. Процесс нагружения ледяного покрова с последующим проломом

Типичный вид диаграмм разрушения показан на рис. 3. На диаграммах выделяются две характерные зоны – первая имеет крутой подъем и может быть интерпретирована как деформация с появлением радиальных трещин; вторая пологая часть по наблюдениям сопряжена с появлением и развитием концентрических трещин.

В результате обработки экспериментальных данных получено две группы результатов. Первая связывает силовые характеристики и величину модуля деформации модельного ледяного поля с приведенной толщиной моделированного льда. Здесь имеется в виду не модуль упругости, который трудно определить из-за сложной связи усилия и прогиба на начальном участке диаграммы, а модуль деформации, определенный по начальной части диаграммы, в которой трудно отделить начало образования радиальных трещин. Приближенное значение этого модуля определялось, как и для случая идеального покрова, по известной формуле Герца [10]. Упомянутые характеристики приведены на графиках на рис. 4. Коэффициент разрушения определялся по формуле (2). Получены формулы аппроксимации, позволяющие использовать данные экспериментов в численных расчетах.

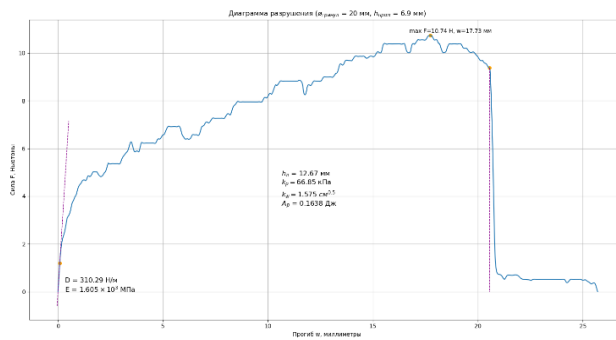
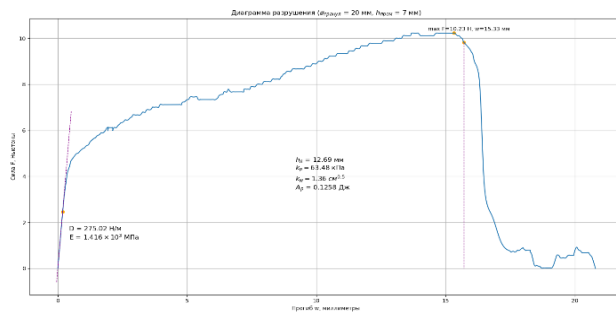
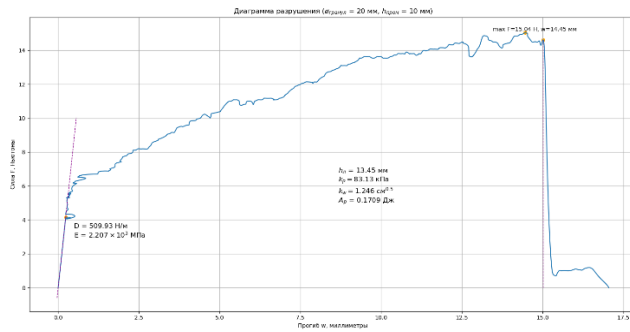


Рис. 3. Типичный вид диаграмм разрушения однослойного композитного льда из гранул 20 мм



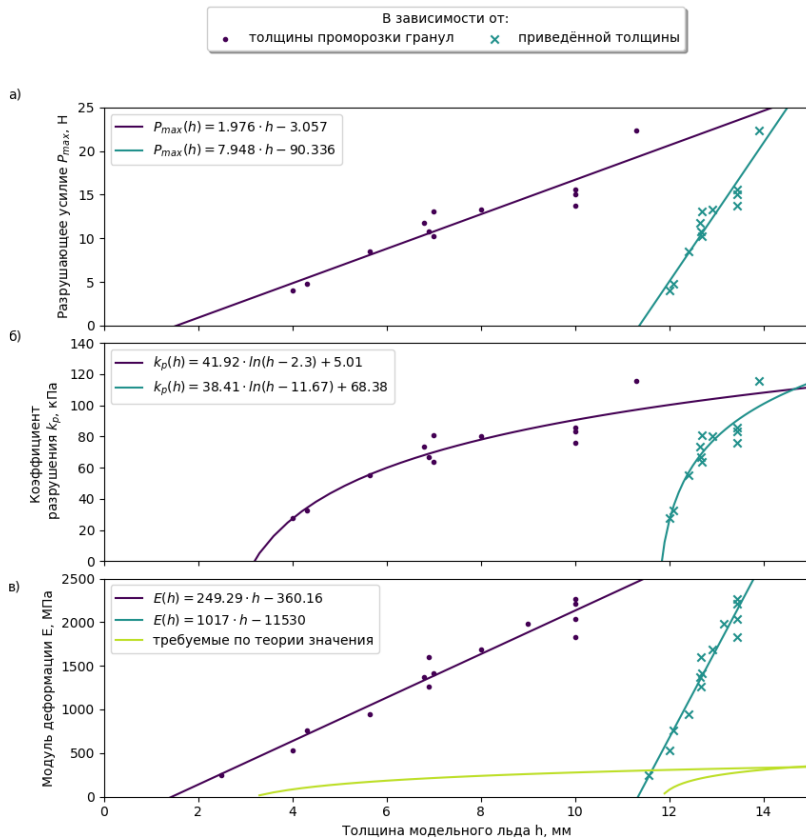


Рис. 4. Основные силовые и деформационные характеристики процесса пролома модельного композитного льда:

*a* – максимальное разрушающее усилие, *b* – коэффициент разрушения, *v* – модуль деформации

Вторая группа результатов связана с оценкой возможности использования полученных результатов с гранулами диаметром 20 мм для задачи моделирования натуральных объектов. Используя выражение (7), связывающее коэффициенты разрушения натурального и модельного ледяного покрова с геометрическим масштабом моделирования, на основе проведённых опытов по разрушению моделированного льда по схеме «центральный пролом», можно определить геометрический масштаб моделирования, соответствующей данной толщине модельного льда  $h$ , а также по (10) определить необходимые характеристики модуля деформации модельного льда для более строго

соответствия классической теории подобия. Кривые требуемых значений приведены на рис. 4, в.

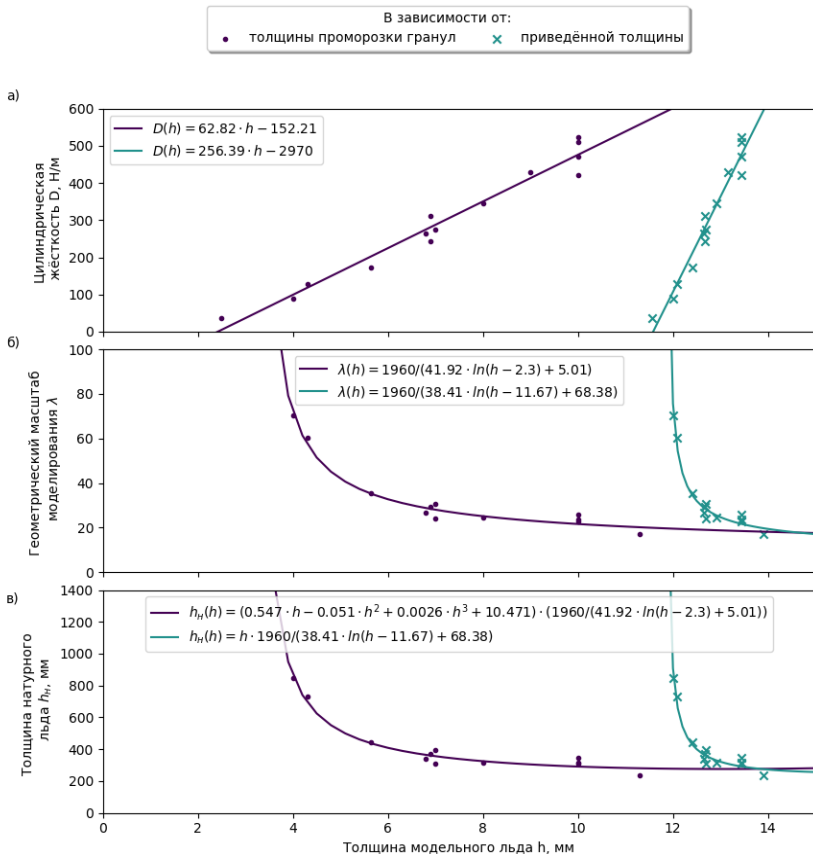


Рис. 5. Параметры моделирования натурального льда с использованием композитной модели ледяного покрова “GP-ice”:  
 а – цилиндрическая жёсткость, б – геометрический масштаб моделирования, в – толщина натурального льда

Из этих данных следует, что при использовании гранул диаметром 20 мм можно обеспечить моделирование толщины ледяного покрова до 800 мм с применением геометрического масштаба  $\lambda$  в пределах 20–70.

Данный предел  $\lambda$  недостаточен для большинства задач, связанных с взаимодействием технических средств и сооружений с натурным ледяным

покровом, однако, полученные результаты указывают на правильность выбранного подхода к применению моделированного композитного льда на основе полиэтиленовых гранул и позволяют наметить направления дальнейших исследований, к которым относятся

- использование гранул другого диаметра, начиная от 3 до 25 мм;
- применение многослойной заморозки гранул размером 3–10 мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00820.

### Литература

1. А.с. 1071515 СССР МПК В 63 В 9/02. Способ испытания моделей судов ледового плавания [Текст] / Зуев В. А., Грамузов Е. М., Беляков В. Б. (СССР). – 3528921; заявлено 09.11.1982; опубл. 07.02.1984, Бюл. № 5.
2. Двойченко, Ю. А. Деформация и пролом ледяного поля [Текст] / Ю. А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. Сб. – Горький, 1980. – С. 38–44.
3. Зуев, В. А. Средства продления навигации на внутренних водных путях [Текст] / В. А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
4. Зуев, В. А. Техника и технология исследований модельного льда в малом ледовом бассейне НГТУ им. Р. Е. Алексеева [Текст] / В. А. Зуев, Ю. А. Двойченко, А. С. Себин // Транспортные системы. – 2019. – № 3. – С. 39–47.
5. Зуев, В. А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова [Текст] / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – Горький, 1984. – С. 4–13.
6. Ионов, Б. П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
7. Ключарев, В. Определение грузоподъемности ледяных переправ [Текст] / В. Ключарев, С. Изюмов // Военно-инженерный журнал. – 1943. – № 2–3. – С. 30–34.
8. Панфилов, Д. Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова [Текст] / Д. Ф. Панфилов // Известия ВНИИГ. – 1960. – № 65. – С. 101–116.
9. Пролом и грузоподъемность льда [Текст] / П. П. Кобеко, Н. И. Шишкин, Ф. И. Марей, Н. С. Иванов // ЖТФ. – 1946. – № 16, вып. 3. – С. 273–276.
10. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки [Текст] / С. П. Тимошенко, С. Войтковский-Кригер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с.

11. Эпштейн, Л. А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов [Текст] / Л. А. Эпштейн. – Л.: Судостроение, 1970. – 208 с.

12. The Experimental and Theoretical Investigations of the “GP-ice” Use in Ships Model Tests / V.A. Zuev, E.M. Gramuzov, Y.A. Dvoychenko, A. S. Sebin // Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 4. – № 459. – 042071.

УДК 628.112

### **Двухуровневая скважина для забора подземных вод**

Медведева Ю. А., Ивашечкин В. В., Сацута Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В данной статье авторами представлена конструкция водозаборной скважины с фильтрами, расположенными в два уровня, способной одновременно выполнять функции рабочей и резервной скважин, применение которой позволит снизить энергозатраты на подъем воды, уменьшить капитальные затраты на строительство и обеспечить бесперебойное водоснабжение. Также приведены зависимости для определения функции понижения напора и особенности фильтрации при работе двухуровневой скважины в напорном водоносном пласте.*

Для обеспечения бесперебойной подачи воды потребителю часто предусматривают устройство двух водозаборных скважин, основной и резервной, для обеспечения бесперебойной подачи воды водопотребителю, имеющих индивидуальные здания насосных станций, а также зоны санитарной охраны строгого режима с внешним ограждением, где устанавливается особый режим эксплуатации территории для защиты от загрязнения [1]. Такая компоновка размещения рабочей и резервной скважин предполагает значительные материальные затраты на сооружение отдельных скважин с павильонами и сетями, а также требует отчуждения значительных площадей под территории их зон санитарной охраны.

В БНТУ была предложена конструкция двухколонной двухуровневой скважины для повышения надежности и долговечности водозаборной скважины, а также снижения удельных затрат на подъем воды (рисунок 1). Скважина состоит из кондуктора 1 с затрубной цементацией 2, первого ствола, имеющего в своем составе эксплуатационную колонну 3, фильтр с рабочей частью 4 и отстойник 5, второго ствола, имеющего в своем составе эксплуатационную колонну 6, фильтр с рабочей частью 7 и отстойник 8, верхнего соединительного патрубка 9, нижнего соединительного патрубка 10,

гравийной обсыпки 11, песчаной засыпки 12, глиняного замка 13, закачных трубок 14-19 с перфорацией 20, выполненных напротив рабочей части фильтров 4 и 7.

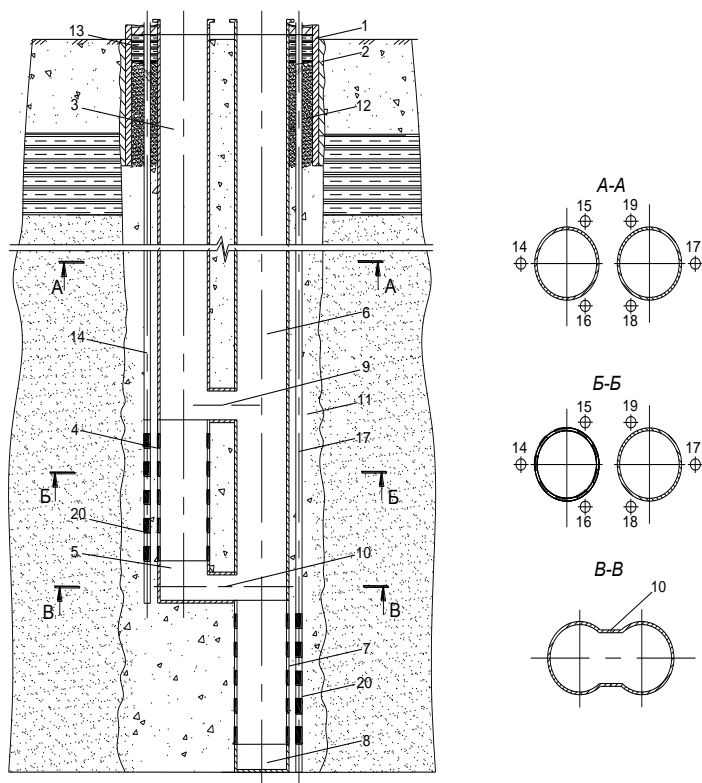


Рис. 1. Конструкция двухколонной двухуровневой водозаборной скважины

Преимуществом двухуровневой конструкции является то, что фильтры установлены в общем водоприемном резервуаре не напротив друг друга, как, например, в двухколонной скважине, предложенной авторами [2, 3], а на разных уровнях, что приведет к повышению водозахватной способности. При такой установке фильтров при одновременной работе двух насосов и при работе любого из насосов по высоте пласта формируются два радиальных фильтрационных потока. Это позволит уменьшить скорость фильтрации на подходе к фильтрам, что создаст условия для снижения потерь напора и

приведет к уменьшению понижения в скважине, обеспечивая снижение себестоимости добываемой воды. С другой стороны, предлагаемая конструкция более надежна, так как при наличии гидравлической связи между двумя колоннами при выходе из строя одного фильтра можно работать любым из насосов или двумя одновременно. При выходе из строя одного насоса до его замены работает другой насос.

Для описания работы двухколонной двухуровневой водозаборной скважины в напорном пласте, подстилаемом относительно менее проницаемыми породами, были получены зависимости для определения понижения напора в любой точке радиуса влияния откачки [4]. Для описания теоретических зависимостей, предлагаемая конструкция была приведена к расчетной схеме, приведенной на рисунке 2, где принимается, что фильтры скважин имеют общую вертикальную ось.

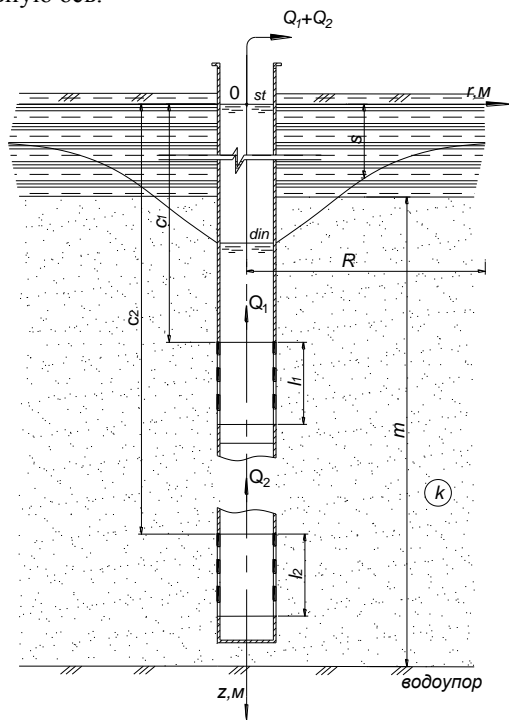


Рис. 2. Расчетная схема двухуровневой скважины

Рассмотрим работу двухуровневой скважины в напорном водоносном пласте, подстилаемом относительно менее проницаемыми породами.

Функцию понижения напора в заданной точке получим путем сложения понижений при работе верхней и нижней скважин:

$$s = \frac{Q_1}{4\pi k} \left[ \frac{A_1}{l_1} + \frac{A_2}{\lambda l_2} - \frac{(1+\lambda)}{\lambda m} \left( \operatorname{arsh} \frac{2m-z}{r} + \operatorname{arsh} \frac{m+z}{r} \right) + \frac{2(1+\lambda)}{\lambda m} \ln \frac{R}{r} \right], \quad (1)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – дебит верхней и нижней скважин;  $k$  – коэффициент фильтрации водоносного слоя;  $m$  – мощность водоносного слоя;  $l_1$  и  $l_2$  – длина фильтра верхней и нижней скважины;  $\lambda = \frac{Q_1}{Q_2}$  – отношение дебитов скважин;  $R$  – радиус влияния откачки;  $r$  и  $z$  – цилиндрические координаты точки, в которой определяется величина напора;  $c_1$  – расстояние верхнего конца фильтра верхней скважины от кровли водоносного пласта;  $c_2$  – то же для фильтра нижней скважины,  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты

$$A_1 = f \frac{c_1+l_1-z}{r} + f \frac{c_1+l_1+z}{r} - f \frac{2m-c_1-l_1-z}{r},$$

$$A_2 = f \frac{c_2+l_2-z}{r} + f \frac{c_2+l_2+z}{r} - f \frac{2m-c_2-l_2-z}{r},$$

Функция  $f \frac{c+l\pm z}{r} = \operatorname{arsh} \frac{c+l\pm z}{r} - \operatorname{arsh} \frac{c\pm z}{r}$ .

Аналогично имеем  $f \frac{2m-c-l\pm z}{r} = \operatorname{arsh} \frac{2m-c-l\pm z}{r} - \operatorname{arch} \frac{2m-c\pm z}{r}$ .

Точка над  $l$  в функции  $f$  означает, что в аргумент вычитаемой функции  $\operatorname{arsh}$  не входит  $l$ .

Для анализа особенностей фильтрации, используя зависимость (1), можно построить гидродинамические сетки фильтрации к скважине.

Применение конструкции двухколонной двухуровневой скважины позволит повысить водозахватную способность, так как при работе одного из насосов приток воды происходит через два фильтра, что обеспечит бесперебойную подачу воды потребителю, имея в каждом стволе отдельный насосный агрегат, и приведет к увеличению удельного дебита и срока службы по сравнению с одноколонной конструкцией.

## Литература

1. Водозаборные сооружения. Строительные нормы проектирования / Водозаборныя збудаванні. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-4.01-30-2009. – Введ. 06.07.2009. – Минск: Минстройархитектуры, 2009. – 13 с.
2. Конструкция водозаборной скважины: пат. 033351 Российская Федерация, МПК Е 03 В 3/06 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, А. Н. Курч; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № 201700325; заявл. 07.06.17; опубл. 30.09.19 // Бюл. № 9 – 3 с.
3. Ивашечкин, В. В. Двуствольная фильтровая водозаборная скважина для эксплуатации одного водоносного горизонта / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, А. Н. Курч // Мелиорация. – 2017. – № 3(81). – С. 36–41.

4. Линзы пресных вод пустыни: Методы исследования, оценки ресурсов и эксплуатации / Акад. наук СССР. Ин-т географии. Упр. геологии и охраны недр при Совете Министров Туркм. ССР. Всесоюз. ин-т гидрогеологии и инж. геологии "ВСЕГИНГЕО" М-ва геологии и охраны недр СССР; [Ред. коллегия: д-р геогр. наук чл.-кор. Акад. наук Туркм. ССР В.Н. Кунин (отв. ред.) и др.]. – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. – 380 с.

УДК 627.8-1

**Разработка методики определения расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах)**

Афанасьев А. П., Шаталов И. М., Рабченя В. С., Пастушек О. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приводятся методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь, которые позволяют определять границы зон вредного воздействия работающих землесосных снарядов, а также результаты расчетов размеров зон вредного влияния, проведенных в ОАО «Белсудопроект» на реке Сож.*

В Республике Беларусь на больших и средних водотоках (реках и каналах) постоянно проводятся дноуглубительные работы с целью организации бесперебойного движения водного транспорта и работы по добыче сыпучих строительных материалов (песка, гравия и т.д.). Вышеуказанные работы связаны с постоянной эксплуатацией землесосных снарядов (земснарядов). При работе земснарядов (особенно при их включении) происходит интенсивное взвешивание частиц грунта, слагающих русло водотока. Далее взвешенные частицы переносятся потоком воды вниз по течению водотока (реки или канала), оказывая вредное воздействие на объекты животного мира и (или) среду их обитания.

За гибель ихтиофауны, снижение ее численности и продуктивности (прироста) при утрате или нарушении среды обитания, вследствие проведения дноуглубительных работ (и работ по добыче сыпучих стройматериалов) на водных объектах, предусмотрены компенсационные выплаты в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении».

Размер компенсационных выплат зависит (в том числе) от размеров зон вредного влияния. Для определения размеров зон вредного влияния



необходимо в первую очередь рассчитать расстояние, на котором будут выпадать на дно взвешенные частицы от места расположения земснаряда.

С этой целью был выполнен анализ современной научно-технической литературы по вопросам транспортирующей способности взвешенных потоков и разработаны три методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь.

Каждая из трех методик может быть использована для любых водотоков Республики Беларусь при определенных параметрах этих водотоков, гранулометрического состава взвеси в русле водотока, скорости движения и глубины потока, гидравлической крупности частиц грунта, а также режимов работы земснарядов.

Первая методика была разработана на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии [1]. Однако применение этой методики ограничено возможностями графоаналитического решения (рис. 1) системы уравнений (1) турбулентной диффузии с конечной скоростью.

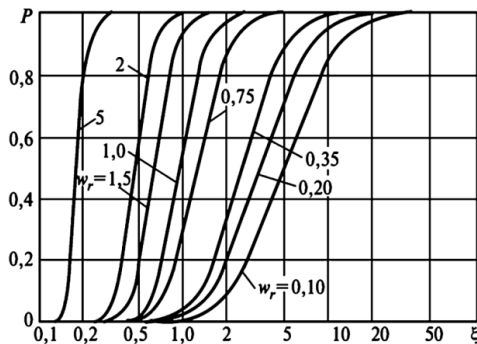


Рис. 1. График для расчета длины выпадения взвешенных частиц на дно водотока

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial t} + u_x \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial x} + (u_z'' - w) \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial z} &= -\omega^{(L)} \mathcal{G}_1 + \omega^{(L)} \mathcal{G}_2, \\ \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial t} + u_x \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial x} - (u_z'' + w) \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial z} &= \omega^{(L)} \mathcal{G}_1 - \omega^{(L)} \mathcal{G}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Вторая методика была разработана на основе эмпирической теории движения наносов [2]. Основной характеристикой в данной методике, определяющей движение твердых частиц в потоке, является скорость их выпадения в спокойной воде, называемая гидравлической крупностью фракций  $w$ ,

которая зависит от формы частиц, их удельного веса, а также от температуры воды, в которой выпадает взвесь. Для того, чтобы определить расстояние  $s$ , на котором выпадают взвешенные частицы, необходимо использовать зависимость

$$s = \frac{(p')^2 u^2 (\sqrt{h} - 0,2)^2}{2,74^2 w^2}. \quad (2)$$

Однако эта методика дает, как правило, значительно завышенные расстояния выпадения частиц, т.к. не учитывает характеристику русла водотока (его размеры, относительную шероховатость и т.д.).

Третья методика была разработана на основе теории расчета гравитационных отстойников с использованием осреднённых параметров взвесенесущих потоков [3]. На основе этой теории полная длина гравитационного отстойника  $L_k$  складывается из длины переходных участков  $l_1$  и  $l_2$  и длины рабочей части  $L_p$ , которая является расстоянием выпадения на дно взвешенных частиц. Приблизительно длину рабочей части определяют на основе вычисления длины отлета частиц расчетного диаметра по формуле:

$$L_p = \alpha H_p v_{cp} / w, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент запаса, равный 1,2–1,5;  $H_p$  – средняя расчетная глубина воды, м;  $v_{cp}$  – средняя скорость течения в камере (рабочая), м/с;  $w$  – гидравлическая крупность наносов [3].

Реальные размеры зон вредного воздействия при работе землесосного снаряда были рассчитаны с использованием предложенных методик и построены в ОАО «Белсудопроект» в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7.02.2008 г. № 168).

На рис. 2, 3 приведены схемы зон вредного воздействия на р. Сож в районе г. Славгорода (перекаты Никольский и Скиток).

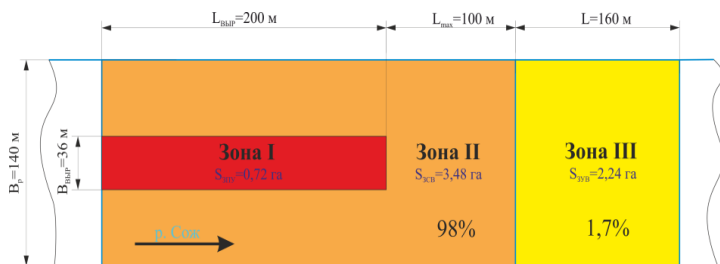


Рис. 2. Зоны вредного воздействия на перекате «Никольский–3» прорезь № 1

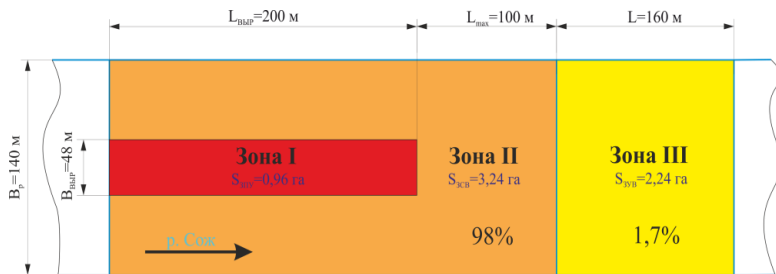


Рис. 3. Зоны вредного воздействия на перекате «Скиток-1» прорезь № 1

Следует отметить, что все три предложенные методики могут быть использованы при расчете размеров зон вредного воздействия на любых водотоках Беларуси. Очередность использования методик должна быть обязательно согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси, ее гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Результаты работы были внедрены в учебном процессе БНТУ, а также на предприятиях водного транспорта Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь: ОАО «Белсудопроект» и ПО «Белводпуть» на участках рек Березина, Сож, Днепр и Неман [4].

### Литература

1. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. Пособие / А. Д. Гиргидов. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2007. – 545 с.
2. Богомолов, А. И. Гидравлика: учеб. пособие / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – Москва: Стройиздат, 1972. – 648 с.
3. Железняков, Г. В. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибад-Ззаде; под ред. В. П. Недриги. – Москва: Стройиздат, 1983. – 544 с.
4. Качанов, И. В. Методы определения расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь / И. В. Качанов, И. М. Шаталов, В. С. Ковалевич, В. С. Рабченя, О. А. Пастушек. – Автоматизация. Электроника – 2019: сборник материалов VII-ой международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизации и мехатроника в машино- и приборостроении», 13-14 марта 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 60–62.

**Эффективность увеличения полезных габаритов камер  
эксплуатируемых шлюзов №№ 1-6 ВБВП**

Богатов А. В.<sup>1</sup>, Гарибин П. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФБУ «Администрация «Волго-Балт»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова»

Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрена актуальная проблема повышения пропускной способности судоходных шлюзов на участке водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро. Даны предложения по реновации шлюзов для пропуска одновременно двух крупнотоннажных судов. На основании анализа разрабатываемых вариантов приводится сравнительная эффективность предлагаемых решений. Обозначены основные проблемы по реализации изменения типа системы наполнения камер шлюзов.*

Участок северного склона Волго-Балтийского водного пути (ВБВП), образованный лестницей шлюзов № 1-№ 6, является одной из наиболее загруженных частей Единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации. На отрезке водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро в наиболее интенсивные периоды навигации скапливается до 180 судов, а время прохождения участка Анненский мост – Онежское озеро составляет 34 часа (не считая стоянки судов в Белом озере – от двух до пяти суток) при среднем нормативном времени прохода данного участка 17 часов [1]. На настоящий момент недостаточная пропускная способность шлюзованных участков водного пути приводит как к снижению конкурентной способности речных перевозок, так и повышению риска возникновения аварийных ситуаций.

Установлен тот факт, что за период с 1997 г. по настоящее время количество судов грузоподъемностью (дедвейт DW) 5000-5500 т составляет в среднем 40 % от транзитного флота и удельный вес их увеличивается, при этом в среднем за навигацию происходит 20-25 % одиночных шлюзований.

Повышение пропускной способности шлюзов №№ 1-6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» за счет изменения параметров эксплуатируемых судопропускных сооружений соответствует приоритетам и целям развития внутреннего водного транспорта РФ [2, 3].

Принципиально существует несколько путей решения этой задачи. Нами рассмотрены два типа реноваций с одновременной оптимизацией процесса судопропуска (рис.): увеличение полезных габаритов камеры шлюза при

сохранении существующей системы питания и изменение типа системы наполнения с безгалерейной головной на более совершенную простую распределительную систему с боковой подачей воды при сохранении существующей длины камеры.

Результаты расчетных исследований оптимизации судопотока с увеличением полезной длины камеры существующих шлюзов за счет смещения нижней головы в сторону нижнего бьефа и добавления к существующей конструкции нового участка камеры приведены в работе [1]. Произведено сравнение целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов (рис., б и в) с вариантом строительства вторых ниток шлюзов, определены основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные показатели реконструированной камеры шлюза без вывода сооружения из эксплуатации. Рекомендуемая область применения данного решения – на всех однокамерных судоходных шлюзах ЕГС Европейской части РФ.

Результаты расчетов судопропускной способности одного шлюза при удлиненной камере (возможности постановки в кильватер двух судов DB 5000 т) показали, что шлюз сможет пропустить на 53 % больше судов DB 5000 т, чем с существующей камерой. Увеличение полезной длины камер шлюзов одновременно приведет и к возможности более рациональной компоновки в камере других судов – оптимизации использования площади зеркала камеры.

По экспертной оценке, общее повышение пропускной способности шлюзов ВВП № 1-№ 6 за счет увеличения полезной длины их камер может составить до 10-15 % и приблизиться на каждом шлюзе к судопропускной способности шлюза № 8 Шекснинского гидроузла.

Реализация данного варианта даст возможность увеличить пропускную способность по тоннажу флота в среднем на 6 млн. т по отношению к максимальной фактической величине за наиболее напряженный период 2008-2014 гг.

Практически увеличение полезной длины камеры шлюза можно осуществить путем демонтажа старых и пристройки новых нижних голов с перестановкой на них механического оборудования с существующих или с установкой нового, но для реализации данного варианта в межнавигационный период необходимо выполнить значительный объем строительно-монтажных работ, включая реконструкцию пульта управления и перенос автомобильного переезда через шлюз. За счет увеличения сливной призмы несколько увеличивается время наполнения и опорожнения камеры шлюза водой.

Варианты реновации по схемам, представленным на рис., б и г, конструктивно менее целесообразны.

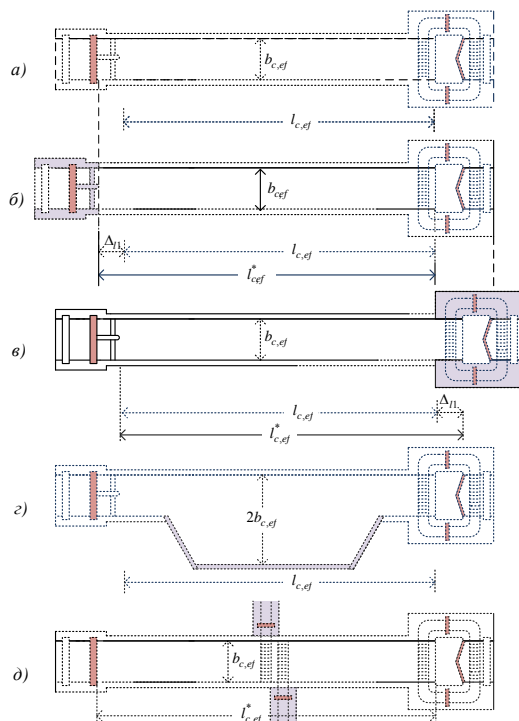


Рис. Принципиальные схемы увеличения полезной длины (ширины) камеры эксплуатируемого шлюза для пропуска двух крупнотоннажных судов DB (5000-5500 т) одновременно:

- а* – эксплуатируемый типовой шлюз №№ 1-6 ФБУ «Администрация «Волго-Балт» с безгалерейной головной системой наполнения и полезными габаритами  $l_{c,ef}$ ,  $b_{c,ef}$ , *б* – увеличение полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса верхней головы в верхний бьеф на величину  $\Delta_{l1}$ , *в* – увеличение полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса нижней головы в нижний бьеф на величину  $\Delta_{l1}$ , *г* – увеличение полезной ширины камеры для шлюзования крупнотоннажных судов в два пьеса без изменения типа системы питания, *д* – увеличение полезной длины камеры за счет изменения типа системы питания

На наш взгляд, альтернативным вариантом увеличения полезной длины камеры является переход от головной системы питания водой камер существующих шлюзов к простой распределительной с боковой подачей воды [4]. В этом случае увеличение полезной длины камеры  $l_{c,ef}^* = l_{c,ef} + \Delta_{I1}$  произойдет за счет демонтажа гасительных устройств и включения в нее существующих участков гашения и успокоения для расстановки судов. При данной схеме реновации сохраняется без изменения вся инфраструктура шлюза (механическое и электрическое оборудование, пульт управления, мостовой переезд). Основные затраты придется на строительство бокового подвода воды, который может быть построен превентивно, не оказывая влияния на судопропуск. Объем сливной призмы, расходуемой на шлюзование, остается неизменным, а время наполнения камеры водой может быть сокращено на 20-30 % за счет использования более совершенной распределительной системы питания.

*Выводы.* При выборе варианта реконструкции шлюза с изменением типа системы питания можно получить шлюз с полезной длиной камеры  $l_{c,ef} = 290$  м. Такой габарит имеют все крупные речные шлюзы Волжско-Камского бассейна, рассчитанные и эксплуатирующиеся для пропуска двух крупногабаритных судов, расположенных в камере в кильватер.

Дополнительными преимуществами перехода к новой системе питания водой камеры (рис., д) являются:

- возможность проведения строительно-монтажных работ в сжатые сроки в межнавигационный период без вывода шлюза из эксплуатации;
- дополнительный эффект по увеличению пропускной способности вследствие уменьшения времени входа судов из верхнего бьефа в шлюз за счет забора воды помимо подходного канала.

### Литература

1. Заключительный отчет по теме: Научное обоснование возможности и целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов №№ 1-6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» в целях повышения пропускной способности. – М.: ЗАО «Акватик», 2015 г. – 359 с.
2. Богатов, А. В. Пути повышения грузопропускной способности Волго-Балтийского водного пути / А. В. Богатов, П. А. Гарибин // Материалы ЕНПК «Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации» 30 ноября 2018 года. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. – 518 с.
3. Богатов, А. В. Увеличение пропускной способности шлюзов №№ 1-6 ВБВП за счет изменения системы наполнения камеры водой / А. В. Богатов, П. А. Гарибин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с

международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Инженерно-строительный институт. В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 308 с.

4. Качановский, Б. Д. Гидравлика судоходных шлюзов / Б. Д. Качановский. – М.–Л.: Речиздат, 1951. – 271 с.

УДК 627.824

### Уклоны свободной поверхности потока на гребне размываемой плотины

Богославчик П. М., Рам Бабу Прасад  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основании экспериментальных исследований подтверждена гипотеза о линейном изменении уклонов свободной поверхности потока для случая размыва однородных плотин из песчаных грунтов. Получены численные значения положения начала координат кривой спада относительно гребня размываемого водослива.*

Ранее было установлено [1], что интенсивное снижение отметки гребня плотины под воздействием переливающегося потока происходит после полного размыва низовой призмы. Профиль размываемой плотины на этой стадии размыва приобретает форму, близкую к форме водослива практического профиля (рис.).

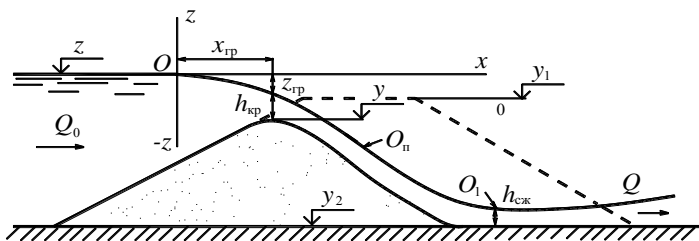


Рис. Схема истечения через размываемую плотину

Из уравнения деформации [2] размывающая способность потока на этой стадии

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{dq_s}{dx} \quad (1)$$



Удельный весовой расход твердого стока можно представить следующей зависимостью

$$q_s = q \cdot f(u, w, h, d), \quad (2)$$

где  $q$  – удельный расход воды, м<sup>3</sup>/с на 1 м ширины потока;  $u$  – средняя скорость потока, м/с;  $w$  – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с;  $h$  – глубина потока, м;  $d$  – диаметр частиц размываемого грунта, м.

Диаметр частиц размываемого грунта  $d$  и их гидравлическая крупность для конкретного случая являются величинами постоянными. Удельный расход воды, средняя скорость потока и его глубина являются величинами взаимосвязанными, а именно:  $q = u \cdot h$ . С учетом этого и на основе анализа известных из речной гидравлики формул удельный весовой расход твердого стока можно представить следующей зависимостью

$$q_s = Aq^a h^b, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент, величина которого зависит от физико-механических характеристик размываемого грунта;  $a$  и  $b$  – показатели степеней, значения которых у разных авторов имеют различные значения.

Подставляя (3) в (1), получаем

$$\frac{dy}{dt} = -Dq^x h^{y+1} \frac{dh}{dx} \quad (4)$$

Для решения данного уравнения необходимо знать закон изменения глубины потока на гребне размываемого водослива по продольной координате  $dh/dx$ . Так как дно размываемого водослива в рассматриваемом сечении на гребне горизонтальное, принимаем  $dh/dx = dz/dx$ , где  $z$  – ордината кривой свободной поверхности потока.

Как отмечалось выше, гидравлическая картина размыва на второй стадии похожа на истечение через водослив практического профиля. Для такой картины уклоны свободной поверхности по длине возрастают, достигая в некоторой точке перегиба  $O_n$  максимума, затем уменьшаются до точки в сжатом сечении  $O_1$ . Образуются две ветви  $OO_n$  и  $O_n O_1$  [3], [4]. Для рассматриваемой задачи интерес представляет первая ветвь. Изменение уклона свободной поверхности потока для кривой  $OO_n$  выражается линейной зависимостью. В представленной системе координат это изменение выражается следующим образом

$$\frac{dz}{dx} = -K \frac{x}{g}, \quad (5)$$

где  $K$  – константа, имеющая размерность [1/Т<sup>2</sup>].

Из уравнения (5)

$$z = -K \frac{x^2}{2g}, \quad (6)$$

откуда

$$K = \frac{2gz}{x^2}. \quad (7)$$

На гребне размываемой плотины устанавливается глубина, равная критической, т.е.

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \quad (8)$$

Приняв коэффициент Кориолиса  $\alpha = 1,0$  и выразив удельный расход формулой  $q = m\sqrt{2g}(z-y)^{1,5}$ , где  $m$  – коэффициент расхода, получим

$$h_{\text{кр}} = 1,26m^{2/3}(z-y). \quad (9)$$

Падение кривой свободной поверхности в сечении на гребне

$$z_{\text{гр}} = (z-y) - h_{\text{кр}} = (z-y)(1-1,26m^{2/3}). \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (6)  $x = x_{\text{гр}}$  и  $z = z_{\text{гр}}$ , получим выражение для определения константы  $K$

$$K = \frac{2gz_{\text{гр}}}{x_{\text{гр}}^2}. \quad (11)$$

Обозначим относительное расстояние от точки  $O$  (начало кривой падения) до гребня  $\beta = x_{\text{гр}} / z_{\text{гр}}$ , тогда формулу (11) с учетом (10) можно записать

$$K = \frac{2g(1-1,26m^{2/3})}{\beta^2(z-y)}. \quad (12)$$

С целью определения величины  $\beta$  были обработаны результаты лабораторных исследований, проведенных на моделях плотин из песчаных грунтов различного гранулометрического состава. Модели отсыпались в лотке шириной 0,1 и 0,32 м. Размеры моделей были следующие: высота 0,4 м, ширина по гребню 0,2–0,4 м, заложение откосов 1:1,5 – 1:3,0. Проведен ряд серий опытов: для грунтов крупностью 0,25–0,5 мм ( $d_{\text{ср}} = 0,35$  мм), 0,1–1,0 мм ( $d_{\text{ср}} = 0,25$  мм), 0,5–1,0 мм ( $d_{\text{ср}} = 0,70$  мм) и 1,0–2,0 мм ( $d_{\text{ср}} = 1,25$  мм). Процесс размыва в опытах фотографировался с расстояния 2,5 м через небольшие интервалы времени. Для каждого опыта было получено до 10–15 мгновенных профилей плотины с кривой свободной поверхности. Фотосъемка велась через стеклянную стенку лотка, на которой была нанесена масштабная сетка. Таким образом, были получены отпечатки профилей свободной поверхности

потока и очертания размываемого массива грунта в каждый фиксированный момент времени. Положение начала координат  $O$  подбиралось последовательным приближением таким образом, чтобы для всех координат кривой  $OO_n$  величина  $z$ , подсчитанная по формуле (7), принимала одинаковые значения. Во всех опытах во все фиксированные моменты времени такое положение начала координат было найдено. Это означает, что в любой момент размыва на кривой свободной поверхности имеется точка, начиная с которой уклон свободной поверхности изменяется по линейному закону. Иначе говоря, подтверждается справедливость формулы (5) для рассматриваемого случая.

Для каждого полученного профиля была определена относительная величина расстояния точки  $O$  до гребня плотины  $\beta$ . Установлено, что в каждом опыте для каждого фиксированного момента времени численные значения величины  $\beta$  колеблются в сравнительно небольших пределах, причем прослеживается зависимость этой величины от крупности размываемого грунта, а именно: с увеличением крупности частиц грунта расстояние точки  $O$  от гребня увеличивается. В результате обработки экспериментальных данных получены следующие значения величины  $\beta$  для грунтов с различной крупностью частиц:

$$d = 0,1-1,0 \text{ мм } (d_{cp} = 0,25 \text{ мм}), \quad \beta = 1,473;$$

$$d = 0,25-0,5 \text{ мм } (d_{cp} = 0,35 \text{ мм}), \quad \beta = 1,635;$$

$$d = 0,5-1,0 \text{ мм } (d_{cp} = 0,70 \text{ мм}), \quad \beta = 2,116;$$

$$d = 1,0-2,0 \text{ мм } (d_{cp} = 1,25 \text{ мм}), \quad \beta = 2,241.$$

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что гипотеза о линейном изменении уклонов свободной поверхности потока справедлива для случая размыва однородных плотин из песчаных грунтов. Получены численные значения положения начала координат кривой спада относительно гребня размываемого водослива.

### Литература

1. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. – № 4. – С. 292–296.
2. Леви, И. И. Динамика русловых потоков / И. И. Леви. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 342 с.
3. Ляпин, А. Н. О построении кривых свободной поверхности на участках водопада / Гидротехническое строительство, 1975, № 11. – С. 22–24.
4. Серопян, К. Г. Результаты исследования размыва моделей дамб из несвязных грунтов в условиях плоской задачи / В сб. «Водозаборные и водопропускные сооружения». Труды института ВОДГЕО. – М., 1981. – С. 88–98.

**Численное моделирование истечения огнетушащей жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения**

Дмитриченко А. С.<sup>1</sup>, Качанов И. В.<sup>2</sup>, Кудин М. В.<sup>3</sup>, Шаталов И. М.<sup>2</sup>,  
Щербакова М. К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Белорусская государственная академия авиации  
Минск, Республика Беларусь

*В статье представлены результаты теоретического и компьютерного моделирования истечения огнетушащей жидкости на выходе из ствола установки импульсного пожаротушения (УИП).*

В настоящее время все больше внимание уделяется повышению эффективности тушения пожаров за счет использования распыленной воды. В Республике Беларусь и за рубежом основным техническим устройством формирования распыленных струй в импульсном режиме является переносная установка импульсного пожаротушения (УИП).

Анализ публикаций, проведенный во время выполнения плановой научно-технической работы ГБ 15-153 «Разработка методики определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротушения» по заданию 2.2.51 п.8 ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» в 2015 г., показал, что, несмотря на широкое распространение технологий импульсного пожаротушения, в настоящее время отсутствуют научно обоснованные методики, позволяющие определить быстрдействие и интенсивность подачи огнетушащих веществ при использовании УИП, что снижает эффективность их применения. С этой целью было проведено компьютерное моделирование формирования и движения распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП.

Компьютерное моделирование формирования и движения распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП проводилось в программном комплексе «ANSYS CFX» на модели ствола УИП, геометрические размеры которого соответствовали реальным размерам ствола, используемого при пожаротушении.

При численном моделировании этого процесса использовалась математическая модель массопереноса двухфазного потока в виде системы уравнений распыливания жидкости

$$\left\{ \begin{array}{l} -grad p' + \mu' \nabla^2 \vec{\omega}' = \rho' \frac{D\vec{\omega}'}{dt}; div \vec{\omega}' = 0; \\ -grad p'' = \rho'' \frac{D\vec{\omega}''}{dt}; div \vec{\omega}'' = 0; \\ \mu' \left( \frac{\partial \omega'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \omega'_k}{\partial x_i} \right)_{гр} = -\rho'' (\vec{v}''_i \vec{v}''_k)_{гр}; \\ p' - 2\mu' \left( \frac{\partial \omega'_k}{\partial x_k} \right)_{гр} = p'' - \rho'' (\vec{v}''_k)_{гр} + \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \\ \vec{\omega}'_{гр} = \vec{\omega}''_{гр} \end{array} \right. \quad (1)$$

и уравнения динамики пузырька Релея-Плессета

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2}{3} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} = \frac{P_{вн} - P}{\rho} \quad (2)$$

Упрощенная запись уравнения движения пузырька позволила создать три модели массопереноса при движении распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП: модель Singhal; модель Zwart-Gerber-Belamri и модель Schnegg-Saner [1].

В процессе моделирования постоянно менялась скорость подачи распыливающего сжатого газа в пределах от 5 до 300 м/с и выше (до 1000 м/с).

Режимы распада струи ограничивались следующими значениями критерия Вебера [2]:

$$We' = 16,6 \left( \frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{жс} d_0 \sigma_{жс}} \right)^{0,3} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho'_г} \right)^{1,05} \quad (3)$$

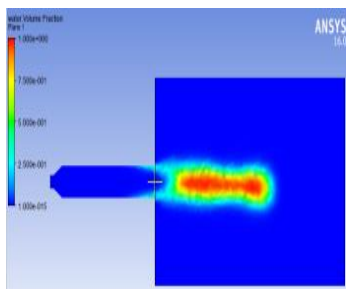
$$We'' = 266 \left( \frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{жс} d_0 \sigma_{жс}} \right)^{0,133} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho'_г} \right)^{0,8} \quad (4)$$

где  $\mu_{ж}$  – динамическая вязкость жидкости.

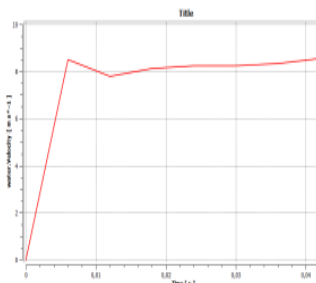
Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 1–3.

Анализ результатов численного моделирования показал, что когда критерий Вебера  $We < We'$ , происходит осесимметричное волновое распыление струи (рис. 1); если  $We' \leq We < We''$ , происходит турбулентно-пульсационное распыление (рис. 2), и при  $We \geq We''$  наблюдается инерционное распыление струи с возможной кавитацией (рис. 3).

Компьютерное моделирование показало, что осесимметричное волновое распыление появляется при скоростях распыливающего сжатого газа порядка до 100 м/с, турбулентно-пульсационное – 100–300 м/с, а инерционное – свыше 300 м/с (в виде облака водяной пыли).



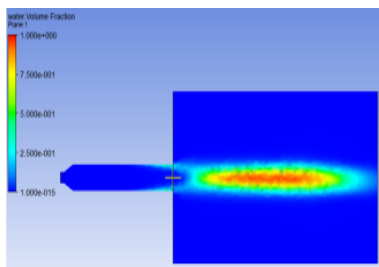
*a*



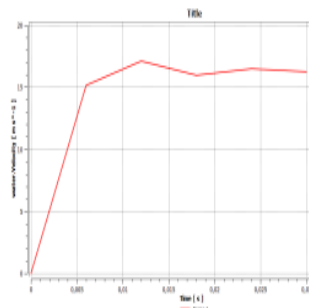
*б*

Рис. 1. Изменение формы и скорости движения огнетушащей струи на выходе из жидкостной камеры СПИ при скорости подачи распыливающего сжатого газа 50 м/с:

*a* – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП, *б* – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП



*a*



*б*

Рис. 2. Изменение формы и скорости движения огнетушащей струи на выходе из жидкостной камеры СПИ при скорости подачи распыливающего сжатого газа 100 м/с:

*a* – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП, *б* – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП

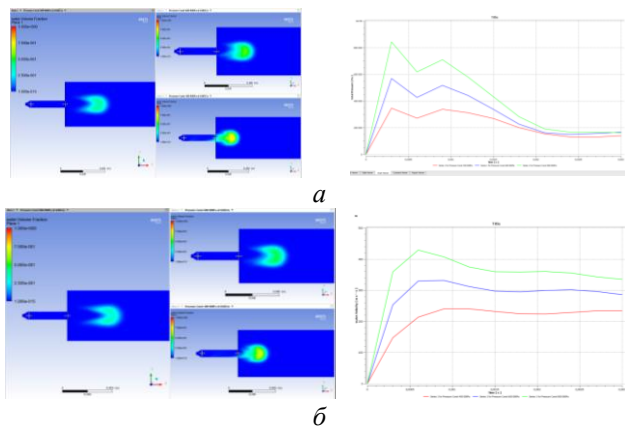


Рис. 3. Графики изменения скорости и давления движения огнетушащей жидкости на выходе (оси) из ствола УИП (скорость подачи распыливающего газа более 100 м/с):  
*а* – гидродинамические характеристики ствола ( $\rho; v; v_{ж}/v_r$ ) в момент времени  $t = 0,0021$  с; *б* – гидродинамические характеристики ствола ( $\rho; v; v_{ж}/v_r$ ) в момент времени  $t = 0,0024$  с

Ввиду того, что скорость истечения жидкости из стволов УИП изменяется во времени, при использовании УИП возможен распад истекающей струи в нескольких режимах.

На базе компьютерного моделирования процесса истечения огнетушащей жидкости из ствола УИП с использованием уравнения Рейля-Плессета установлены границы режимов распада струи. При скоростях движения распыливающего сжатого газа от 50 до 100 м/с наблюдается режим волнообразного распада распыливаемой жидкости (рис. 2), который сопровождается появлением капель со средним диаметром 250–750 мкм; при скоростях сжатого газа 100–300 м/с – турбулентно-пульсационное распыление со средним диаметром капель от 100 до 500 мкм; при скоростях сжатого газа свыше 300 м/с наблюдается тонкодисперсный (10–100 мкм) распад двухфазного потока жидкости на капли под действием кавитации и внешних инерционных сил непосредственно в плоскости выходного отверстия, сопровождающиеся тонкодисперсным облаком водяной «пыли».

При практическом использовании СПИ УИП для тушения пожаров основные механизмы прекращения горения с помощью воды и составов на ее основе наиболее полно реализуются при прохождении капель распыленной струи через пламя. Найденные путем компьютерного моделирования гидродинамические характеристики распада и распыления огнетушащей жидкост-

ти позволяют определить оптимальные количественные рабочие параметры стволов УИП для тушения пожаров различной категории сложности.

### Литература

1. ANSYS FLUENT12.0 Theory Guide, April 2009. ANSYS Inc.
2. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 413 с.

УДК 614.843.3

### **Численное моделирование движения огнетушащей жидкости в проточной части установки импульсного пожаротушения (УИП)**

Дмитриченко А. С.<sup>1</sup>, Качанов И. В.<sup>2</sup>, Кудин М. В.<sup>3</sup>,  
Шаталов И. М.<sup>2</sup>, Щербакова М. К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Белорусская государственная академия авиации

Минск, Республика Беларусь

*В статье представлены результаты теоретического и компьютерного моделирования движения огнетушащей жидкости в проточной части установки импульсного пожаротушения.*

Вода на настоящий момент является одним из самых распространенных средств пожаротушения. До 90 % всех пожаров ликвидируется именно водой, и это наиболее простой, экологически чистый и дешевый способ [1, 2]. Традиционное оборудование (например, пожарные стволы) имеет ряд недостатков, основным из которых является нанесение значительного ущерба вследствие применения чрезмерного количества воды.

В настоящее время все большее внимание уделяется повышению эффективности тушения водой за счет уменьшения подаваемого удельного расхода и увеличению степени использования огнетушащего вещества (ОТВ). Это достигается использованием при тушении пожаров распыленной воды (РВ) и составов на ее основе, подаваемых к месту пожара различными системами, установками и устройствами. Например, установками импульсного пожаротушения (УИП), в состав которых входит ствол пожаротушения импульсный (СПИ). На кафедре ГЭСВТГ БНТУ в 2015 г. было выполнено научно-техническое исследование установок импульсного пожаротушения в рамках ГБ 15-153 «Разработка методики определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротуше-



ния» по заданию 2.2.51 п.8 ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций».

Основным техническим устройством УИП, подающим ОТВ на формирование струи РВ, является ствол, который в общем случае состоит из газовой (воздушной) и жидкостной (водяной) камер, соединенных быстродействующим клапаном. На выходе ствола может устанавливаться насадок с распылителем, чаще всего выполняемый из гибкого материала (резины). При открытии клапана происходит вытеснение рабочим газом жидкости через насадку с распылителем в окружающее пространство. Основными характеристиками, влияющими на режим истечения жидкости и процесс формирования распыленной струи, являются давление в газовой (воздушной) камере ствола, скорость подачи распыливающего сжатого газа, количество жидкости в жидкостной (водяной) камере, диаметр отверстия насадка с распылителем и геометрические размеры самого ствола, т.е. длины газовой  $l_g$  и жидкостной  $l_{ж}$  камер.

Геометрическая модель ствола УИП представлена на рис. 1.

Газ и жидкость располагаются в цилиндрическом резервуаре диаметром  $d_p$  и занимают объемы, характеризующиеся длинами  $l_g$  и  $l_{ж}$ , разделенные плоской твердой границей с конически расходящимся насадком (на схеме условно не показан). Газ находится под давлением  $P_0$ , жидкость – при давлении окружающей среды  $P_E$ . Далее жидкость вытесняется через цилиндрический насадок диаметром  $d_n$  и длиной  $l_n$  в окружающую среду.

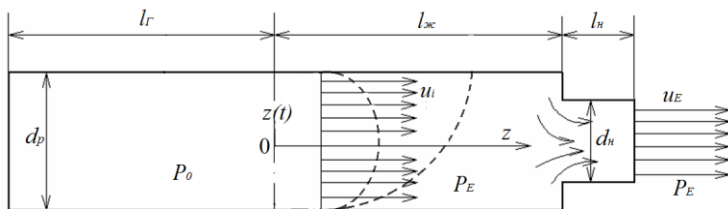


Рис. 1. Геометрическая модель СПИ

Предполагается, в отличие от предыдущих исследователей, что в процессе вытеснения граница раздела жидкость-газ подвержена неустойчивости Рэлея-Тейлора, а также действию других факторов, разрушающих её структуру, и имеет криволинейную форму в виде овала или в виде параболы (штриховая линия на рис. 1).

В стволе УИП происходит импульсное вытеснение жидкости сжатым газом, которое можно считать неустановившимся резкoизменяющимся

(импульсным) движением распыливаемой жидкости с адиабатическим расширением распыливающего газа в стволе УИП и на выходе из него.

Такое движение можно моделировать путем использования двух уравнений: уравнения импульса и уравнения неразрывности с учетом инерционных потерь давления. Систему этих уравнений для двухфазного потока жидкости можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\alpha\rho_\alpha\vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\alpha\rho_\alpha\vec{v} \otimes \vec{v}) = -\alpha\nabla p + \alpha\nabla t - R\vec{v} \\ \frac{\partial(\beta\rho_\beta\vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\beta\rho_\beta\vec{v} \otimes \vec{v}) = -\beta\nabla p + \beta\nabla t - R\vec{v} \end{cases} \quad (1)$$

Численное моделирование движения жидкости в стволах УИП проводилось в современном пакете вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX, в который включены различные математические модели, в том числе и модели движения двухфазных потоков (жидкость-газ) и распыления жидкостей.

Для численного моделирования движения огнетушащей жидкости в стволе УИП в качестве объекта была выбрана жидкостная (водяная) камера ствола УИП, основные геометрические параметры которой полностью соответствовали реальным размерам ствола, используемым в практике пожаротушения в Республике Беларусь и за рубежом. Расчетная область определялась координатами  $X, Y, Z$  декартовой системы координат, задававшимися путем твердотельного моделирования жидкостной (водяной) камеры в пакете «ANSYS CFX».

Моделирование проводилось с различными соотношениями  $d_n/d_p$ , применяемыми в практике пожаротушения. Скорость подачи распыливающего сжатого газа варьировалась в пределах 5–50 м/с, 50–100 м/с, 100–300 м/с и свыше 300 м/с.

Некоторые результаты численного моделирования представлены на рис. 2.

Проведенное моделирование позволило сделать следующие выводы:

1. В результате взаимодействия распыливающего газа с распыливаемой жидкостью граница раздела фаз имеет не плоскую, а криволинейную форму, причем при скоростях течения распыливающего сжатого газа до 50 м/с эта граница имеет форму параболы, а при скоростях – 50–300 м/с и выше (до 1000 м/с) – форму овала, вытягивающегося в симметричную параболу и в ярко выраженный клин

2. Режимы течения и диспергирования (распада и распыления) огнетушащей жидкости зависят от размеров жидкостной камеры (её диаметра  $d_p$ ) и отверстия истечения ( $d_n$ ). При соотношениях  $d_n/d_p > 0,80 \div 0,85$  устанавлива-

ется резкоизменяющийся (импульсный) характер течения огнетушащей жидкости с волнообразным распадом (диспергированием или распылением) струи жидкости; при  $d_H/d_p \leq 0,85 \div 0,5$  движение огнетушащей жидкости в стволе УИП приобретает элементы квазистационарного течения с волнообразным у отверстия истечения и последующим турбулентно-пульсационным распылением; при  $d_H/d_p < 0,5$  движение жидкости в стволе УИП, из-за резкого увеличения гидравлического сопротивления отверстия истечения, можно считать квазистационарным, при этом изначально кавитационное переходит в чисто инерционное (даже сверхзвуковое) распыление жидкости в плоскости отверстия истечения или в непосредственной близости от него.

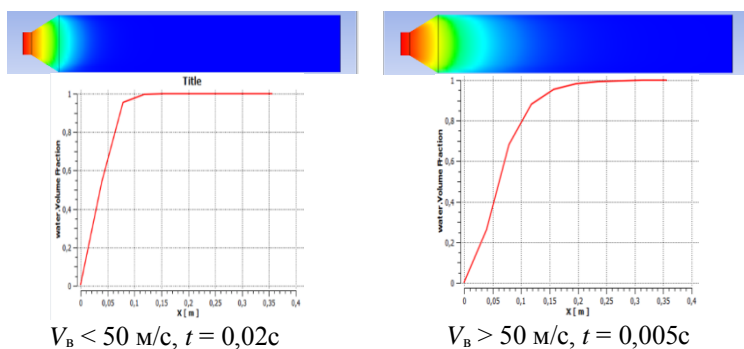


Рис. 2. График изменения соотношения воздух-вода в газо-жидкостном потоке при скоростях подачи распыливающего сжатого газа до и свыше 50 м/с

В заключении следует отметить, что установленные режимы течения огнетушащей жидкости в проточной части ствола УИП позволяют выбрать наиболее оптимальные конструктивные и гидродинамические параметры ствола УИП для тушения пожаров различной сложности.

### Литература

1. Корольченко, А. Я. Технология импульсного водяного пожаротушения IFEX 3000 / А. Я. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2001. – № 2. – С. 3–5.
2. Дауэнгауэр, С. А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С. А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 78–81.

**Мониторинг технического состояния камеры судоходного шлюза**

Гарибин П. А., Ольховик Е. О., Федяшов А. В.  
ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С. О. Макарова»  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Рассмотрены особенности эксплуатации судоходных шлюзов. Дана оценка методик проведения и результатов натурных наблюдений за техническим состоянием камер шлюзов. На основании анализа организации наблюдений обозначены основные проблемы в сфере организации и проведения мониторинга камер шлюзов с использованием технологии информационного моделирования (BIM).*

Начавшаяся в 1980-х годах и продолжающаяся в первые десятилетия XXI века цифровая революция, именуемая как концепция «Индустрия 3.0» (Third Industrial Revolution – TIR) [1], приводит к широкому внедрению информационных технологий жизненного цикла, в частности – BIM (Building information modeling).

До последнего времени в России отсутствовала новая транспортная платформа, использовались технологии 1980-х годов, снижение логистических издержек достигалось за счет организационных мер. Выход из этой ситуации во всем мире находят за счет использования новых информационных технологий. В последнее время все больший интерес вызывает концепция «Индустрия 4.0» (Industry 4.0) – совокупность технологий PLM, Big Data, Smart Factory, Cyber-physical systems, IoT (Internet of Things), Interoperability, использование которых позволяет создать эффективную бизнес-модель объекта.

Внедрение концепции «Индустрия 4.0» и, в первую очередь технологии IoT, возможно при наличии хорошо налаженных процессов получения, обмена и анализа данных. По сведениям уже работающих по рассматриваемой стратегии предприятий, даже частичное использование ими PLM приводит к уменьшению затрат на 50–80 %.

Обеспечение безопасности и надежности в процессе эксплуатации судоходных гидротехнических сооружений (СГТС) тесно связано с качеством и эффективностью их технического контроля. Особенностью большей части гидротехнических сооружений является то, что они возводятся на участках местности со сложными геологическими и гидрогеологическими показателями, подвержены воздействию напора воды, ее размывающему воздействию, действию льда и волн, фильтрационных потоков и других нагрузок, которые все являются циклическими.

Мировой опыт гидротехнической эксплуатации показывает, что ослабление контроля приводит к повреждению и разрушению гидротехнических сооружений, что для крупных объектов может быть связано с катастрофическими последствиями.

Мониторинг технического состояния строительных конструкций СГТС выполняется в настоящее время преимущественно путем их визуального осмотра и локальных инструментальных измерений. В зависимости от вида объекта визуальный мониторинг выполняется по списку в соответствии с правилами нормативных документов. По результатам мониторинга разрабатывается комплекс мероприятий по ремонту, замене или усилению элементов конструкций.

В связи с совершенствованием измерительных систем, включая датчики различного назначения, в последнее время начали проводить постоянный или *непрерывный мониторинг* технического состояния строительных конструкций с контролем нормативных параметров, определяющих их прочность и деформируемость [2]. Стало возможным назначать ремонт конструкций не по списку, как в первом случае, а по их фактическому состоянию. Это приводит, как правило, к увеличению межремонтных сроков при обеспечении той же безопасности конструкций. При такой технологии стоимость затрат на обследование уменьшается, а надежность увеличивается.

Для определения необходимости ремонта используется график изменения индекса «здоровья» СГТС (прогиб лицевой стенки, прочность материала и т. д.) и характер его изменения во времени (рис.).

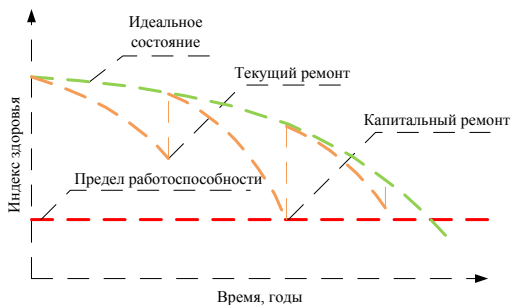


Рис. Схема оценки работоспособности конструкции

Индекс «здоровья» является комплексной характеристикой [3], значение которой зависит от конструкции, материала, вида нагрузок и цели мониторинга. С целью выполнения подобной процедуры разрабатываются автоматизированные системы мониторинга конструкций (СМК), в нашем случае камера СГТС.

Ведутся исследовательские работы по созданию макета технического паспорта с применением BIM-технологий. Технология предусматривает использование готовых BIM-проектов, построение BIM-модели сооружения на основе натуральных обмеров цифровыми геодезическими приборами, восстановление BIM-модели из архивных цифровых и бумажных документов.

Сложной является задача построения прогнозной модели [4] и определения допустимых параметров, определяющих работоспособность сооружения, а также степень его физического износа. Особо следует отметить теоретические разработки ученых ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [5], которые внесли весомый вклад в решение проблемы определения эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений и идентификацию прогнозных моделей.

Оптимизация процесса управления жизненным циклом камеры шлюза достигается после реализации этапа внедрения непрерывного автоматизированного мониторинга, который является определяющим импульсом к развитию платформы «Индустрия 4.0».

Первоочередной задачей мониторинга технического состояния СГТС является разработка сети чувствительных элементов, которые непрерывно контролируют состояние строительной части в автоматическом режиме – обеспечение контролепригодности системы.

Организованная система расстановки контрольно-измерительной аппаратуры – не только инструмент для проведения частных измерений. Ее функционал предполагает постоянную работу, результат которой – данные, достаточные для построения пространственно-временной 3D-модели индуцированных нагрузок и ответных реакций на них.

Второй важной задачей является разработка комплексной модели оценки технического состояния ГТС, основными исходными данными для расчетов и моделирования тогда будут являться данные мониторинга и предыдущих инструментальных осмотров.

В данной постановке по результатам изучения СГТС известными являются множество переменных, по которым оценивается состояние объекта (модели), границы допустимых значений переменных, желаемые значения этих переменных. Критериальные переменные имеют допустимые границы изменения и некоторую область желаемых (оптимальных) значений. Оценочная функция выбирается таким образом, чтобы в области допустимых значений переменной ее значения принадлежали бы интервалу  $[0, 1]$ , были безразмерными, определялись однозначно, и функция была бы линейной или кусочно-линейной [10, 11].

Такой подход позволяет снизить дорогостоящие расходы на осмотры и обследования и во многих случаях может служить обоснованием для ремонта сооружения. Кроме того, использование системы непрерывного

мониторинга улучшит расследования случаев аварий, поскольку появляется объективная информация о процессах во время нарушения режима эксплуатации.

Решение поставленных задач базируется на использование аппарата математической статистики. Результатом выполненных работ будет интеллектуальный продукт в виде комплекса «автоматизированный мониторинг технического состояния» – «комплексная модель оценки технического состояния» – «прогнозная модель».

Созданная технология для каждого конкретного шлюза позволит обеспечить безопасность эксплуатации СГТС уже на принципиально новом практическом уровне и дать качественный прогноз на заданный временной период, т.е. в полном объеме реализовать концепцию анализа жизненного цикла (CALS-технология).

В качестве «ядра» комплексной модели оценки технического состояния нами предлагается использование точной трехмерной компьютерной модели СГТС, которая в дальнейшем будет использоваться как для информационного сопровождения, так и для прямых расчетов с применением метода конечных элементов.

### **Литература**

1. Рифкин, Дж. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. – М.: «Альпина Нон-фикшн», 2014. – 410 с. – ISBN 978-5-91671-332-9.

2. Гарибин, П. А. Методология организации непрерывного мониторинга технического состояния ГТС водного транспорта / П. А. Гарибин, О. Е. Ольховик, С. В. Шабанов // Известия Вузов. Строительство. – 2015. – № 2 (674). – С. 58–72.

3. Wenzel, H. Health Monitoring of Bridges / H. Wenzel. – Wiley & Sons Ltd., 2009. – 652 p.

4. Гарибин П. А. Обеспечение контролеспособности сооружений – один из этапов построения прогнозных моделей / П. А. Гарибин, В. Е. Марлей, Г. Г. Рябов // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – Выпуск I (V). – 190 с.

5. Ивашинцов, Д. А., Соколов А. С., Шульман С. Г., Юделевич А. М. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений / Д. А. Ивашинцов [и др.]. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2001. – 432 с.

**Технология регулирования уровней грунтовых вод  
при подпочвенном увлажнении**

Курчевский С. М.<sup>1</sup>, Павлов А. А.<sup>2</sup>

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

Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Рязанский государственный агротехнологический

университет им. П. А. Костычева

Рязань, Российская федерация

*В данной статье указана технология регулирования уровня грунтовых вод (УГВ) путем подпочвенного циклического увлажнения, а также расчет динамики УГВ при использовании данного метода.*

Технология подпочвенного увлажнения в результате длительного подпора УГВ должна обеспечить требуемый режим нормы осушения в течение вегетации культур [1]. Для засушливого года нормы осушения уменьшают, для влажного – увеличивают на 20 %.

Увлажнение путем длительного подпора УГВ начинают сразу после окончания весеннего паводка при снижении грунтовых вод до глубины 0,5–0,7 м. Для этого закрывают шлюзы-регуляторы на проводящей сети и прекращают сброс воды из системы.

В случае выпадения ливневых дождей, вызвавших значительный подъем грунтовых вод, шлюзы на каналах открывают и после достижения требуемой нормы осушения закрывают и продолжают увлажнение. По окончании вегетационного периода осушительно-увлажнительную сеть опорожняют и производят профилактический ремонт каналов и сооружений.

Циклическое увлажнение начинают при снижении влажности почвы до величины 60–70 % НВ (или 45–55 % от ПВ) и за счет интенсивного подъема УГВ доводят влажность пахотного слоя до НВ. Для этого перекрывают регулирующий колодец на дренажном коллекторе и по увлажнительному коллектору подают воду в истоки дрен-увлажнителей.

Интенсивность подъема УГВ возрастает при подаче воды в истоки дрен, осуществляемой одновременно с подпором горизонта воды в сбросном канале. При достижении уровня грунтовых вод 50–60 см системы переключают на сброс, для чего прекращают подачу воды по увлажнительному каналу и открывают регуляторы в колодцах.

После окончания каждого цикла увлажнения рекомендуется проводить промывку дренажа пропуском транзитного расхода воды по дренам и коллекторам в течение 20–30 минут [2].



Изменение влажности почвы в процессе подпочвенного увлажнения определяют по графику (рис. 1).

Количество воды  $Q$ , необходимое для осуществления подъема УГВ, определяют по формуле:

$$Q = \mu \Delta H \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – требуемая величина подъема УГВ, м;  $\mu$  – коэффициент недостатка насыщения почвогрунта, определяемый по формуле А. В. Черенкова:

$$\mu = 96,5 \cdot \delta \cdot W_a^{-1,25}, \quad (2)$$

где  $W_a$  – влажность почвы перед началом увлажнения, % от объема;  $\delta$  – коэффициент водоотдачи, определяемый по формуле Г. Д. Эркина:

$$\delta = 0,056 \cdot K_\phi^{0,5} \cdot \Delta H^{0,33}, \quad (3)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации, м/сут.

При циклическом подпочвенном увлажнении продолжительность цикла зависит от интенсивности подъема УГВ и времени его стабилизации.



Рис. 1. Динамика УГВ и влажности почвы (% полной влагоемкости) при подпочвенном увлажнении:

1 – уровень грунтовых вод, 2 – изоплоты влажности почвы, 3 – влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости

Наиболее интенсивный подъем УГВ происходит в первые 5-7 суток, в течение 8-10 суток величина подъема достигает 85-95 % общей величины подъема грунтовых вод. Полная стабилизация УГВ наступает через 14 суток от начала увлажнения. С целью повышения оперативности регулирования водного режима почвы и экономии поливной воды целесообразно продолжительность увлажнения принять не более 8-10 суток. В связи с испарением в этот период поливную норму, определенную по формуле (1), следует

увеличить на 20-30 %. Для расчета поливной нормы можно пользоваться номограммой (рис. 2).

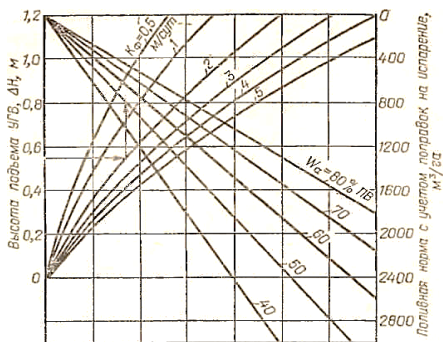


Рис. 2. Номограмма для определения поливных норм при циклическом увлажнении

В песчаных и супесчаных почвах с коэффициентом фильтрации 1-5 м/сут при глубоком (свыше 10-15 м) залегании водоупорных пород величину подъема грунтовых вод в процессе подпочвенного увлажнения определяют по формуле А. В. Черенкова:

$$\Delta H = \Delta H_1 + 1,33\Delta H_1^{0,47} (T^{0,28} - 1), \text{ м}, \quad (4)$$

где  $T$  – время от начала увлажнения, сут;  $\Delta H_1$  – величина подъема УГВ, м, за первые сутки от начала увлажнения, численно равная скорости подъема  $V_{II}$ :

$$V_{II} = a_1 \sqrt{\frac{(\varphi h_d - h_0)^3}{b}} \pm a_k, \text{ м/сут}, \quad (5)$$

где  $h_d$  – напор в дрене, м;  $h_0$  – начальный напор УГВ (относительно оси дрены) перед увлажнением, м;  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий диаметр дрены и конструкцию дренажного фильтра;  $b$  – удаление от дрены-увлажнителя, м;  $a_k$  – параметр, определяющий влияние открытой сети, м/сут;

$$a_k = a_2 \sqrt[3]{\frac{\Delta H_k}{B^{2,3}}}, \quad (6)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  – параметры, зависящие от типа почвы (для почвогрунтов с диапазоном изменения коэффициента фильтрации 1-5 м/сут принимают в среднем  $a_1 = 0,8$  и  $a_2 = 1,0$ );  $\Delta H_k$  – разность отметок уровня воды в канале и уровня грунтовых вод перед увлажнением, м;  $B$  – расстояние от открытого канала, м.

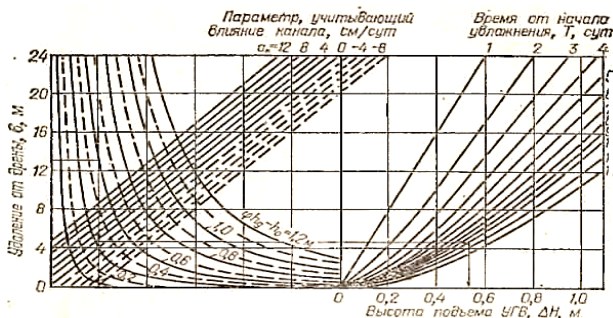


Рис. 3. Номограмма для расчета подъема УГВ при подпочвенном увлажнении

Если в период увлажнения каналы оказывают дренажное действие, параметр  $a_k$  в формуле (5) принимают со знаком минус.

Для практических расчетов динамики УГВ при циклическом подпочвенном увлажнении с учетом параметров и конструкции дренажа можно использовать номограмму (рис. 3).

При использовании данной методики могут быть решены следующие задачи:

- определение высоты подъема УГВ за время  $T$ ;
- определение расстояния между дренажами-увлажнителями;
- определение времени  $T$  подъема УГВ;
- определение необходимого напора в дренажах-увлажнителях.

### Литература

1. Маслов, Б. С. Осушительно-увлажнительные системы / Б. С. Маслов, В. С. Станкевич, В. Я. Чернена. — М.: Колос, 1981. — 279 с.
2. Циприс, Д. Б. Двустороннее регулирование водного режима почв / Д. Б. Циприс, М. Г. Саноян. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 184 с.

УДК 627.1:627.41

### Методика расчета устойчивости русел судоходных водотоков

Михневич Э. И.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основе совместного решения уравнений пропускной способности и критерия устойчивости судоходного водотока получены морфометри-*

ческие зависимости для определения параметров динамически устойчивого русла в условиях воздействия водного потока и судовых волн. Приведены формулы для расчета устойчивости креплений откосов судоходных водотоков каменной наброской и железобетонными плитами.

Русла судоходных водотоков формируются под воздействием водного потока и судовых волн, оказывающих разрушительное действие на откосы, что может вызвать не только заиливание русла продуктами размыва, но и создать угрозу прибрежным строениям, речным портам и причалам [1]. Оценка устойчивости русла и откосов водотока и прогнозирование возникновения возможных деформаций позволяют принимать технические и организационные меры по их предупреждению разрушений.

Ранее нами [2] получены формулы для определения критерия устойчивости русла несудоходных водотоков  $\eta_y$  и его параметров (ширины по верху  $B$  и средней глубины  $H_c$ ) при пропуске руслоформирующих расходов. Для судоходных водотоков возникает необходимость дополнительного учета влияния на формирование русел деформаций откосов под воздействием судовых волн. Для приближенной оценки этого фактора введем коэффициент  $\beta_c$ , зависящий от высоты судовых волн  $h_b$ , воздействующих на откосы и вызывающих их разрушение. Значение этого коэффициента может быть принято равным

$$\beta_c = 1 + 0,7h_b^2, \quad (1)$$

где  $h_b$  – расчетная высота судовой волны у берега водотока, которая может быть определена по формуле [3]

$$h_b = \frac{1,6v_c^2}{g(1-k)^{2,5}} \sqrt{\frac{\delta h_{oc}}{l_c}}, \quad (2)$$

где  $v_c$  – скорость движения судна, м/с;  $\delta$  – коэффициент полноты водоизмещения судна;  $h_{oc}$ ,  $l_c$  – соответственно осадка и длина судна, м;  $k$  – коэффициент стеснения живого сечения русла,  $k = \frac{\Omega}{\omega}$  ( $\Omega$  – подводная площадь поперечного сечения судна, м<sup>2</sup>;  $\omega$  – площадь живого сечения русла, м<sup>2</sup>);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Тогда с учетом коэффициента  $\beta_c$  критерий устойчивости русла судоходного водотока можно представить в следующем виде:

$$\eta_y = \frac{P_s}{\beta_c g \rho_b H_c I}, \quad (3)$$

где  $I$  – уклон руслоформирующего потока;  $\rho_b$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $P_s$  – показатель прочности грунта, Па, определяемый по формуле

$$P_s = g \rho_1 d f + c_p, \quad (4)$$

где  $d$  – расчетный диаметр частиц грунта, м;  $\rho_1$  – плотность грунта с учетом взвешивания его водой, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_1 = (\rho_s - \rho_e)(1 - n_s)$ ;  $\rho_s$ ,  $\rho_e$  – плотность соответственно частиц грунта и воды, кг/м<sup>3</sup>;  $n_s$  – пористость грунта;  $f$  –

коэффициент внутреннего трения грунта в воде;  $c_p$  – удельное структурное сцепление грунта при разрыве в воде, Па, приближенно равно  $c_p = 0.0032/\sqrt{d}$  (средний диаметр  $d$ , м; при  $d > 1$  мм можно принимать  $c_p = 0$ ).

Многолетние натурные наблюдения, проведенные нами на реках Белоруси, показали, что участки с меньшими значениями критерия устойчивости  $\eta_y$  имеют большие отношения  $B/H_c$ , т.е. между  $B/H_c$  и  $\eta_y$  существует обратно пропорциональная связь, которую для судоходных рек, с учетом коэффициента  $\beta_c$ , можно представить в следующем виде

$$\frac{B}{H_c} = \lambda_c \frac{\beta_c g \rho_B H_c l}{P_s}, \quad (5)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент стабилизации русла.

Руслоформирующий расход равен  $Q = v\omega = vBH_c$ . Определяя скорость потока  $v$  по формуле Шези и скоростной коэффициент  $C$  по формуле Павловского  $C = \frac{1}{n} H_c^y$ , получим

$$Q = CBH_c^{1,5} I^{0,5} = BH_c^{y+1,5} I^{0,5} \frac{1}{n}, \quad (6)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла,  $y$  – показатель степени, равный  $y = 1,5\sqrt{n}$  при  $R < 1$  м;  $y = 1,3\sqrt{n}$  при  $R > 1$  м или принимаемый приближенно  $y = 0,2$ .

Решая совместно уравнения (5) и (6) вначале относительно  $H_c$ , а затем относительно  $B$ , после преобразований получаем морфометрические зависимости для ширины  $B$  и средней глубины  $H_c$  устойчивого русла

$$B = I^{\frac{y+0,5}{y+3,5}} (Qn)^{\frac{2}{y+3,5}} \left( \frac{\beta_c \lambda_c g \rho_B}{P_s} \right)^{\frac{y+1,5}{y+3,5}} \quad (7)$$

$$H_c = \frac{1}{I^{\frac{1,5}{y+3,5}}} \left( \frac{Qn P_s}{\beta_c \lambda_c g \rho_B} \right)^{\frac{1}{y+3,5}} \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) морфометрический параметр  $B/H_c$  будет

$$\frac{B}{H_c} = I^{\frac{y+2}{y+3,5}} (Qn)^{\frac{1}{y+3,5}} \left( \frac{\beta_c \lambda_c g \rho_B}{P_s} \right)^{\frac{y+1,5}{y+3,5}}. \quad (9)$$

Значения коэффициента стабилизации русла  $\lambda_c$  найдены для канализованных русел несудоходных рек ( $\beta_c=1$ ) с расходом воды  $Q = 20-100$  м<sup>3</sup>/с, проложенных в песчаных грунтах,  $\lambda_c = 5,0-7,6$ . Для судоходных рек получено среднее значения произведения  $\lambda_c \beta_c = 17,5$ . Значения коэффициента  $\lambda_c$  изменяются в пределах 13-16 и несколько возрастают с увеличением расхода  $Q$ . Значение коэффициента  $\beta_c$  может быть принято по формуле (1). Коэффициент стабилизации русла  $\lambda_c$  – это интегральная характеристика для однородной группы водотоков, объединенных общими признаками: подобием гидрологического режима и условий руслоформирования.

Русло с параметрами  $B$  и  $H_c$ , рассчитанными по приведенным выше морфометрическим зависимостям, будет находиться в динамически устойчивом состоянии и обеспечивать пропускную способность максимального расхода.

Если расчетные морфометрические параметры русла из-за большой ширины и малой глубины не обеспечивают глубину, требуемую для условий судоходства, то для предохранения откосов от разрушения водным потоком и действием волн русло крепят.

Для предотвращения разрушения откосов водным потоком и действием волн обычно в качестве креплений применяют каменную наброску или железобетонные плиты. Расчет устойчивости креплений в условиях действия судовых волн можно производить по излагаемой ниже методике.

Исходя из теории предельного равновесия, нами [4] получен критерий устойчивости откоса  $\Pi_1$  при воздействии волн в следующем виде

$$\Pi_1 = \frac{\rho_1(mf-1)d}{h+ah_b f \sqrt{1+m^2}}, \quad (10)$$

где  $\rho'_1 = \rho_s / \rho_e$  – относительная плотность грунта;  $h$  – глубина потока на поверхности откоса при откате волны, м;  $a$  – коэффициент взвешивающего волнового давления, возникающего при откате судовой волны, принимают  $a = 0,60$  для сплошного крепления [3] и  $a = 0,6(1 - n_s)$  для зернистых материалов;  $h_b$  – высота расчетной судовой волны, м, по формуле (2);  $m$  – коэффициент заложения откоса.

Данный критерий может быть использован для получения формул по расчету устойчивости креплений. Принимая в полученном критерии (10) для каменной наброски  $\rho'_1 = \rho_k / \rho_e$  ( $\rho_k$  – плотность камня, кг/м<sup>3</sup>) и решая этот критерий относительно диаметра камня  $D$ , м, в условиях предельного равновесия ( $\Pi_1 = 1$ ) получим (с учетом коэффициента запаса  $K_3$ )

$$D = K_3 \frac{h+0,6(1-n_s)h_b f \sqrt{1+m^2}}{(\rho_k/\rho_e)(mf-1)}, \quad (11)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий неравномерность распределения каменной наброски по откосу,  $K_3 = 1,20$  для каменной наброски из несортированного материала,  $K_3 = 1,0$  для каменного мощения;  $h$  – средняя глубина воды на поверхности откоса при откате волны, может быть принята  $h = (0,3-0,5) h_e$ ;  $n_s$  – пористость материала наброски;  $f$  – коэффициент трения каменной наброски по слою обратного фильтра из щебня  $f = 0,9-1,0$ , из гравия  $f = 0,8-0,9$ .

При использовании в качестве крепления железобетонных плит влиянием влекущей силы потока на поверхности плит можно пренебречь, т.е. принять  $h = 0$ . Учитывая, что для сплошного крепления значение коэффициента  $a$  в формуле (10)  $a = 0,60$ , зависимость для определения толщины плит  $\delta_n$  будет иметь вид

$$\delta_n = K_3 \frac{0,6h_b f \sqrt{1+m^2}}{(\rho_k/\rho_e)(mf-1)}, \quad (12)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, для сборных плит принимают  $K_3 = 1,10$ , а для монолитных плит  $K_3 = 1,0$ .

Основное крепление откосов устраивается в зоне интенсивного волнового воздействия, нижнее облегченное крепление – в зоне возможного размыва грунтов основания откоса течением воды и потоком обтекания при движении судов. Верхнее облегченное крепление обычно выполняют в виде одерновки, посева трав, крупнозернистой наброски. Его граница выбирается конструктивно, исходя из особенностей берега. Верхнюю границу основного крепления откосного типа принимают на уровне расчетной высоты наката волны.

### Литература

1. Гладков, Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: Монография. – 2-е изд., стер./ Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. – Санкт-Петербург: Изд. Лань, 2019. – 432 с.
2. Михневич, Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э.И. Михневич. – Минск: Ураджай, 1988. – 240 с.
3. Алперин, И. Е. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И. Е. Алперин, П. С. Быков, В. Б. Гулевич. – М.: Транспорт, 1973. – 216 с.
4. Михневич, Э. И. Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия / Э. И. Михневич // Наука и техника. – 2018. – Том 17, № 2. – С. 100–105.

УДК 625.73

### **Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спиральновитых гофрированных труб**

Моргунов К. П., Ивановский Ю. К.

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Представлены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов шероховатости внутренней поверхности металлических спиральновитых гофрированных труб с полимерным и цинковым покрытием. Рассмотрены два типоразмера гофрированных труб: диаметром 500 мм с гофром размерами гофра 68×13 мм и диаметром 1000 мм с гофром размерами 125×26 мм. Исследовался безнапорный режим течения потока в трубе с различными степенями наполнения. По результатам выполненных работ рекомендованы количественные значения коэффициентов шероховатости для каждого диаметра труб.*

Водопрopusкные трубы из различного материала (бетонные, металлические, пластиковые) являются наиболее распространенным типом малых водопрopusкных сооружений, используемых при проектировании и строительстве автомобильных дорог. Металлические гофрированные трубы выполняются с нормальным (МГТ) и спиральновитым (СВМГТ) гофром, который составляет острый угол с диаметральной осью трубы (рис. 1). Величина угла спиральности  $\varphi$  изменяется в зависимости от размера гофра и диаметра трубы, с увеличением диаметра трубы угол спиральности уменьшается.

По виду основного защитного покрытия различают гофрированные трубы с одиночным покрытием (цинковым, алюминиевым, сплавом цинка с алюминием или другим металлизированным покрытием) и с двойным покрытием (металлизированное плюс полимерное покрытие), наносимым в заводских условиях.

Трубы из гофрированных металлических конструктивных элементов имеют шероховатость, которая отличается от шероховатости технически гладких труб. Гидравлические условия работы гофрированных труб вследствие повышенной шероховатости стенок имеют свои особенности.

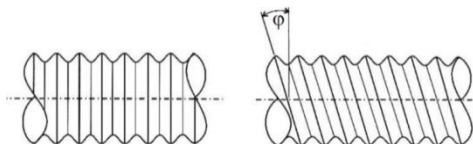


Рис. 1. Схемы труб с нормальным и спиральновитым гофром

Задачей выполненных исследований являлось экспериментальное обоснование выбора величины коэффициента шероховатости СВМГТ при движении потока в трубе в безнапорном режиме при различной степени наполнения трубы.

Экспериментальное определение коэффициента шероховатости основано на использовании формулы Шези для равномерного режима движения потока жидкости [1], которая устанавливает зависимость расхода от гидравлических характеристик потока:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega$  – площадь живого сечения потока,  $\text{м}^2$ ;  $C$  – коэффициент Шези,  $\text{м}^{0.5}/\text{с}$ ;  $R = \frac{\omega}{\chi}$  – гидравлический радиус живого сечения,  $\text{м}$ ;  $\chi$  – смоченный периметр,  $\text{м}$ ;  $i$  – гидравлический уклон, который при



равномерном движении потока со свободной поверхностью равен геометрическому уклону дна и свободной поверхности.

Коэффициент Шези определяется по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \quad (2)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости.

Из формул (1) и (2) можно выразить коэффициент шероховатости

$$n = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что для определения коэффициента шероховатости необходимо знать расход жидкости, уклон потока, а также геометрические характеристики живого сечения: площадь, смоченный периметр и гидравлический радиус, которые зависят от степени наполнения трубы. Очевидно, что геометрические характеристики зависят от величины угла  $\alpha$ , под которым из центра трубы видна свободная поверхность потока в трубе (рис. 2).

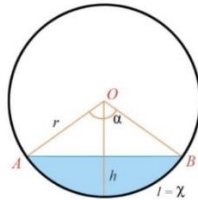


Рис. 2. Схема движения потока воды в трубе

Площадь живого сечения, представляющая собой круговой сегмент, рассчитывается, если угол выражен в градусах, как

$$\omega = \frac{r^2}{2} \left( \pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right).$$

Из рис. 2 видно, что угол  $\alpha$  определится следующим образом:

$$\alpha = 2 \arccos \left( \frac{r-h}{r} \right),$$

где  $h$  – глубина потока в трубе;  $r$  – радиус трубы.

Эксперименты по определению коэффициентов шероховатости гофрированных труб проводились в русловом лотке гидротехнической лаборатории

имени профессора В. Е. Тимонова ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова (г. Санкт-Петербург).

Установка представляла собой металлический каркас (рис. 3), на котором с напорной стороны перпендикулярно продольной оси лотка закреплялся щит, полностью перегородивающий поток в лотке. В щите устраивалось входное отверстие для оголовка гофрированной трубы, размеры которого определялись диаметром исследуемой трубы. Исследовались трубы двух диаметров: 500 мм с гофром 68×13 мм и 1 000 мм, размеры гофра 125×26 мм.

Формула (3) справедлива для равномерного характера движения потока, что означает равенство глубины потока вдоль оси трубы. Для контроля характера движения вдоль оси в трубу были врезаны пьезометры, показывающие глубину потока.

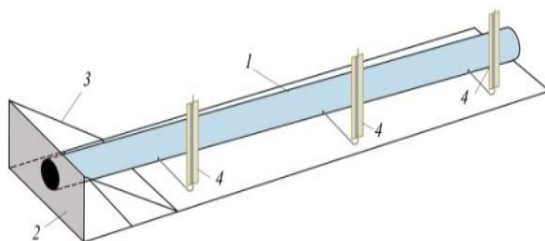


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:  
1 – испытуемая гофрированная труба, 2 – щит с входным отверстием,  
3 – металлический каркас, 4 – пьезометры

Эксперименты выполнялись по следующей методике:

- в лоток с установленным в нем экспериментальным стендом подавалась вода; регулированием расхода воды устанавливались различные степени наполнения трубы;
- после установления равномерного характера течения в СВМГТ выполнялись замеры контролируемых величин: расхода и нормальной глубины;
- рассчитывались гидравлические характеристики течения: площадь живого сечения потока, смоченный периметр, гидравлический радиус живого сечения;
- по формуле (3) рассчитывался коэффициент шероховатости.

Исследования были проведены для разных уклонов дна труб: 0,03, 0,02 и 0,01 при разных степенях заполнения.

Результаты экспериментального определения коэффициентов шероховатости для труб приведены в табл.

Таблица

Экспериментально определенные коэффициенты шероховатости СВМГТ

Диаметр трубы, мм	Облицовка	Среднее значение коэффициента шероховатости	Разброс относительно среднего значения, %
500	Полимер	0,02018	1,0 – 2,5 %
	Оцинковка	0,02047	1,2 – 2,6 %
1000	Полимер	0,02541	1,1 – 3,4 %
	Оцинковка	0,02535	0,7 – 4,4 %

Результаты выполненной серии экспериментов показали, что определяемые коэффициенты шероховатости для труб рассматриваемого диаметра зависят практически только от диаметра труб и размеров гофра. Величина полученных коэффициентов шероховатости не зависит от уклона расположения трубы, степени наполнения и материала облицовки.

Полученные значения коэффициентов рекомендованы к использованию при выполнении гидравлических расчетов водопропускной способности соответствующих спиральновитых металлических гофрированных труб.

### Литература

1. Моргунов, К. П. Гидравлика / К. П. Моргунов. – СПб.: Лань, 2014. – 288 с.

УДК 626.141

### Реверсивно-струйная очистка металлических и бетонных поверхностей от продуктов коррозии

Качанов И. В., Шаталов И. М., Жук А. Н., Филипчик А. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований реверсивно-струйной очистки металлических и бетонных поверхностей от продуктов коррозии.*

В настоящее время широкое применение в промышленном и строительном производстве нашли пескоструйные и дробеструйные способы очистки, которые обладают рядом серьезных недостатков [1].

Некоторые из этих недостатков устраняются путем применения метода гидроабразивной очистки (ГАО). Процесс очистки состоит в эрозионном воздействии высокоскоростной водяной струи и твердых абразивных частиц

на обрабатываемый материал. Недостатком ГАО является неполное использование кинетической энергии струи жидкости, взаимодействующей с преградой. Этот недостаток устраняется путем использования реверсивно-струйного течения рабочей жидкости относительно обрабатываемой поверхности. Для получения такого течения сопловый блок помещается в корпус, который позволяет произвести разворот струи на  $180^\circ$  и тем самым увеличить силовое воздействие на обрабатываемую поверхность ориентировочно на 70-80 %, решить вопросы по сбору жидкости после проведения очистки поверхности и отправить ее на регенерацию.

На кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ была разработана, исследована и запатентована [2] новая технология и устройство для формирования реверсивной струи рабочей жидкости, воздействующей на преграду (рис.).

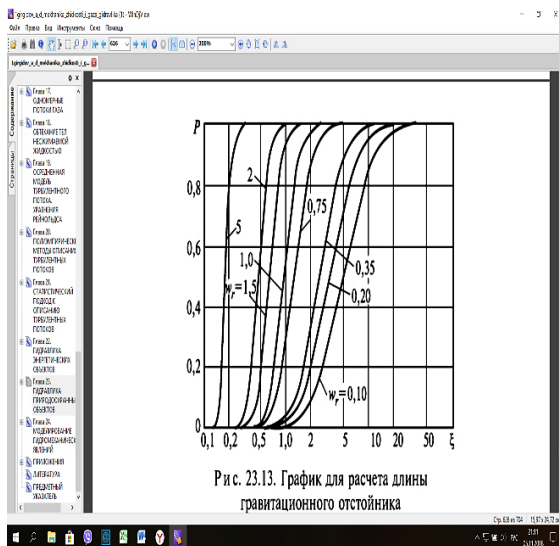


Рис. Устройство для очистки от коррозии плоских стальных и бетонных поверхностей:

- 1 – бак напорный, 2 – насадок, 3 – манжета струеформирующая, 4 – насос, 5 – стакан цилиндрический, 6 – обрабатываемая поверхность, 7 – уплотнение, 8 – крышка, 9 – бак для регенерации

В процессе обработки при ударе струи о плоскую преграду сила давления  $P$  прямо пропорциональна плотности жидкости  $\rho$ , площади сечения струи  $\omega$  и квадрату средней скорости струи  $v$ , т.е.

$$P = \rho \cdot \omega \cdot v^2, \quad (1)$$

или

$$P = \rho \cdot v \cdot Q, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с; ( $Q = v \cdot \omega$ );  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – площадь сечения струи рабочей жидкости, м<sup>2</sup>;  $v$  – средняя скорость струи, м/с.

При ударе струи рабочей жидкости в плоскую поверхность с обеспечением ее разворота на 180° сила давления определяется по формуле

$$P = 2 \cdot \rho \cdot v \cdot Q. \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что при неизменных параметрах обработки  $v$  и  $Q$ , в результате разворота струи на 180°, сила удара ее на очищаемую поверхность возрастает в два раза, но в формуле (3) не учтены прочностные характеристики разрушаемого слоя коррозии.

Для определения величины давления при воздействии реверсивной струи на преграду с учетом прочностных характеристик разрушаемого слоя коррозии был использован метод механики – метод верхней оценки или приближенный энергетический метод [3]. Этот метод основан на условии баланса мощностей внешних и внутренних сил, действующих на поверхностях разрушаемых коррозионных слоев, и предполагает использование расчетных уравнений (4) и (5) [4,5]. В этих уравнениях в качестве основного расчетного критерия принят коэффициент обжатия струи  $\lambda$ , который позволяет спрогнозировать минимальное давление разрушения слоя коррозии, установить для данного  $\lambda$  величину струйного давления  $p_{стр}$  и корректно подобрать насосно-силовое оборудование.

$$p = 2\tau_n \left( (1 + \lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha - \beta) \cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha - \beta) \sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha - \beta)} \right) + \rho v^2 \left( \lambda^2 \frac{\sin^2 \beta \sin(\xi - \beta) \cos(\alpha - \beta)}{\sin^3 \xi \cos \alpha} + (1 + \lambda)^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha - \beta)} \right), \quad (4)$$

где  $p$  – гидродинамическое давление, возникающее в точке соударения струи с преградой, Н/м<sup>2</sup>;

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_{cm}}{d\alpha} = 2\tau_n \left( (1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right) = 0 \\ \frac{dp_{cm}}{d\beta} = 2\tau_n \left( (1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Дифференцирование системы уравнений (5) позволило получить выражения (6) для расчёта оптимальных углов  $\alpha$  и  $\beta$  кинематически возможного поля линий скольжения, обеспечивающих минимальное значение давления струи  $p_{стр}$  при разрушении обрабатываемого материала.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \beta + \arccos \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3\left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{\lambda}\right)} \\ \beta = \arctg \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3 \cdot \lambda + 5} \end{array} \right. \quad (6)$$

Для проверки полученных теоретических решений были проведены экспериментальные исследования процесса реверсивно-струйной очистки (PCO) стальных поверхностей на специальном стенде, разработанном на кафедре «ГЭСВТГ».

Для проведения эксперимента были выбраны шесть типов заготовок с различными коэффициентами обжатия  $\lambda$ , определяемыми по формуле

$$\lambda = \frac{d_{cmp}}{D_0 - d_{cmp}}, \quad (7)$$

где  $d_{стр}$  – диаметр струи, принятый равным диаметру сопла, мм,  $D_0$  – диаметр полости заготовки, мм.

Для формирования струи рабочей жидкости PCO использовалось сопло с диаметром, равным 1,2 мм.

В результате проведенных исследований установлено влияние расстояния от сопла до обрабатываемой заготовки на силу воздействия струи и получено его оптимальное значение. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что максимальное значение давления струи на преграду  $p$  достигается при коэффициенте обжатия струи  $\lambda = 0,063$ .

При использовании РСО увеличивается эффективность и качество очистки обрабатываемых поверхностей, более рационально используется кинетическая энергия струи, снижается энергоёмкость производимых работ, повышается производительность процесса очистки и культура производства.

### **Литература**

1. Проволоцкий, А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – Киев: Техника, 1989. – 177 с.
2. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. №16526, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00; В 63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Шарий, Р. О. Мяделец; дата публ. 30.10.2012.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 654 с.
4. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов. – Минск: Технопринт, 2002. – 327 с.
5. Качанов, И. В. Теоретические исследования процесса реверсивно-струйной очистки судовых поверхностей от коррозии / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. А. Ключников, А. А. Кособуцкий, И. М. Шаталов, В. С. Ковалевич, Е. В. Качанова // *Materialy XIV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Nauka i innowacja - 2018»*, Volume 2 *Przemysł: Nauka i studia.* – 84 s.

УДК 627.816

### **Роль малой ГЭУ в составе комплексной электростанции**

Гатилло С. П., Артёмчик А. А., Чуприк А. И.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Разработана методика расчета совместной работы комплексной электростанции, состоящей из ГЭС или ГЭС-ГАЭС и нескольких ВЭУ, где ГЭУ используется в качестве аккумулятора энергии ВЭУ. С учетом допустимого значения величины колебания уровня воды в водохранилище определена возможность регулирования мощности комплексной электростанции.*

В нашей стране сделано много для освоения возобновляемых энергоресурсов. К проблемам, которые не способствуют развитию возобновляемой энергетики, относится непредсказуемость выработки электроэнергии во времени. При большой удельной доле такой энергии в энергосистеме последней выдвигается требование участия подобных электростанций в регулировании мощности, что и определено Указом Президента Республики Беларусь № 357

от 24 сентября 2019 г. «О возобновляемых источниках энергии», где сказано, что «установки ... установленной электрической мощностью 1 МВт и более привлекаются с 1 января 2021 г. к участию в регулировании суточного графика покрытия электрической нагрузки Белорусской энергетической системы».

Это означает, что электростанции на возобновляемых источниках энергии должны будут точно прогнозировать свой мощностной график работы, что для них крайне сложно и может привести к простоям и недоиспользованию природных источников энергии.

В работе рассматриваются варианты решения данной проблемы. Предлагается включать в состав комплексных электростанций малые гидроэнергетические установки (ГЭУ), то есть малые ГЭС или малые ГЭС-ГАЭС (гидроэлектростанции, которые работают на бытовом стоке и кроме того обладают возможностью аккумулировать за счет машинного водоподъема определенные объемы воды в водохранилище) и несколько ветроэнергетических установок (ВЭУ). Ставится задача за счет одновременного использования нескольких природных источников и аккумулирования получить возможность более точно прогнозировать участие такой комплексной электростанции в работе энергосистемы.

Предполагается изучить возможности регулирования (с целью максимального выравнивания в течение некоторого периода времени) выдаваемой в сеть мощности.

Рассматривается работа комплексной электростанции, в состав которой входит ГЭУ (мощностью более 10 МВт) и ряд ВЭУ.

Для расчета гидроэнергетической составляющей были взяты данные для створа построенной малой ГЭС. Рассматривается возможность переоснащения ее в малую ГЭС-ГАЭС.

В этом случае при включении в состав такой комплексной электростанции блоков, использующих энергию ветра (ВЭУ) и естественных водных потоков (ГЭС), а также предлагаемой ГЭС-ГАЭС расчетной мощности при ограничении энергосистемой суточного объема принимаемой электроэнергии, все образующиеся излишки энергии могут в виде воды накапливаться в водохранилище и превращаться в поставляемую в электроэнергосистему энергию в часы ее отгрузки.

Рассмотрена комплексная электростанция, состоящей из пяти ВЭУ мощностью 3,63 МВт каждая и ГЭС мощностью 17 МВт (с установленными на ней пятью гидроагрегатами).

При использовании имеющихся данных о расходах воды в реке и распределении скоростей ветра для декабря 2013 года в результате расчетов года получены графики, показанные на рис. 1.



Величина вырабатываемой ВИЭ энергии непредсказуема и непостоянна во времени. На рисунке 1 видны значительные колебания располагаемых мощностей как от ГЭС, так и суммарной от ГЭС и ВЭУ.

Выполнена проверка возможности выравнивания выдаваемой мощности ГЭС за счет перераспределения стока (путем накапливания и сбрасывания объемов воды с постоянными колебаниями УВБ). Итоги расчета показали, что имеется возможность значительного выравнивания располагаемой мощности ГЭС при колебании уровней в верхнем бьефе от НПУ в пределах 0,4 м в обе стороны, что можно оценить в сумме величиной порядка 0,8 м.

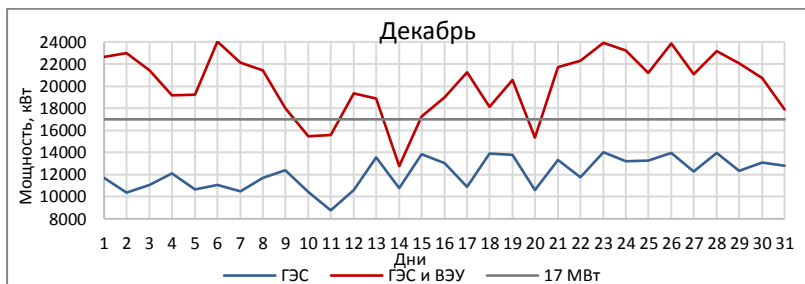


Рис. 1. Графики изменения располагаемых мощностей для ГЭС и для ГЭС и ВЭУ

Если же в составе комплексной электростанции в обязательном порядке включается ряд ВЭУ, то существующие пики мощностей от ВЭУ предлагается сгладить (регулировать) с помощью таких компонентов комплексной электростанции, как ГЭС (вариант 1) или ГЭС-ГАЭС (вариант 2).

Выравнивание по варианту 1 происходит за счет отключения выдачи части мощности на ГЭС и накапливании в это время воды за счет выдачи в энергосистему мощности от ВЭУ.

Выравнивание по варианту 2 происходит и за счет отключения выдачи части мощности от гидротурбин на ГЭС-ГАЭС, а также за счет использования вырабатываемой на ВЭУ энергии на работу обратимых гидромашин (ОГМ) в насосном режиме и накапливании в это время воды в водохранилище. Если колебания уровней воды в верхнем бьефе были ограничены величиной 0,8 м, то этого недостаточно для полного выравнивания располагаемой мощности от комплексных электростанций, но для равнинной местности с размещением водохранилищ в пределах берегов без выхода на пойму с учетом требований охраны природы увеличить пределы колебания уровней представляется проблематичным.

Для определения требуемого диапазона колебания уровней воды в водохранилище для максимального выравнивания выдаваемой мощности от комплексной электростанции были проведены расчеты, результаты которых приведены на рисунках 2 и 3.

При исследовании комплексной электростанции в составе ГЭС и ВЭУ оказалось, что при возможности увеличения абсолютных пределов колебания УВБ до 2,3 м изменение мощности, выдаваемой в течение месяца комплексной электростанцией, составляет 0,74 МВт (рис. 2).

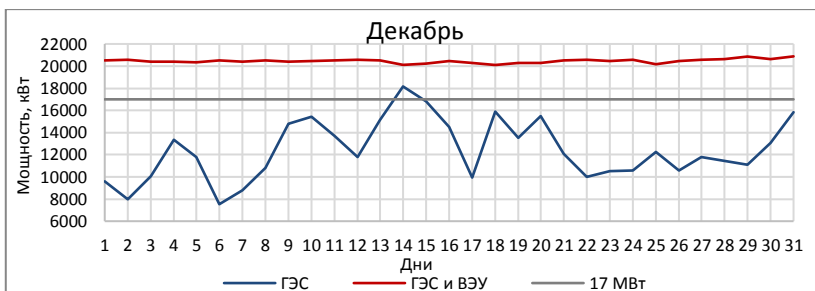


Рис. 2. Графики изменения располагаемых мощностей для комплексной электростанции в составе ГЭС и ВЭУ и для ГЭС

Для комплексной электростанции в составе ГЭС-ГАЭС и ВЭУ колебания УВБ составят 2,0 метра при колебаниях выдаваемой мощности в пределах тех же 0,74 МВт (рис. 3).

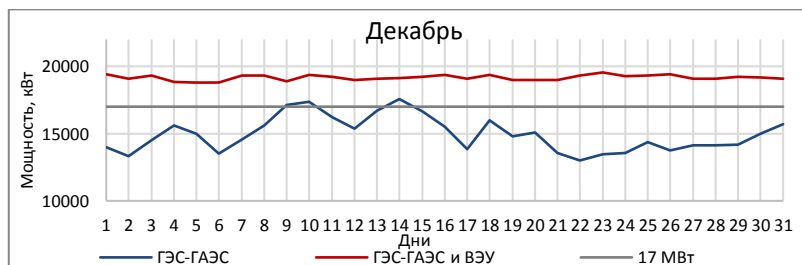


Рис. 3. Графики изменения располагаемых мощностей для комплексной электростанции в составе ГЭС-ГАЭС и ВЭУ и для ГЭС-ГАЭС

Таким образом, в результате расчетов определена величина возможных колебаний уровней воды в водохранилище для различных вариантов регулирования мощности комплексной электростанции.

**Коническая насадка с оптимальным углом конусности  
для гидромониторных стволов**

Качанов И. В., Шаталов И. М., Жук А. Н., Филипчик А. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены результаты теоретических исследований по определению оптимального угла конусности конической насадки гидромониторных стволов.*

Основным рабочим элементом гидромониторных стволов является конфузор [1], позволяющий сформировать струю рабочей жидкости с заданными энергетическими характеристиками.

Анализ патентно-информационных источников [2,3] показывает, что задача по определению оптимального угла конусности конфузоров до настоящего времени не получила корректного решения. Процесс формирования струи в конфузорах определяется соотношением площадей входного и выходного отверстий и конфигурацией каналов.

С целью математического обоснования оптимального угла конусности  $\alpha$  конфузора струеформирующего устройства была решена вариационная задача по минимизации потерь напора в потоке жидкости, проходящей через конфузор. При расчете конфузора полная потеря напора  $h$  на трение определялась как сумма двух видов потерь напора: потери на трение по длине  $h_{mp}$  и местные потери напора на плавное сужение  $h_{n.c.}$  [4], т. е.

$$h = h_{mp} + h_{n.c.} \quad (1)$$

Потеря напора на трение по длине рассчитывалась с использованием формулы Дарси-Вейсбаха, записанной в дифференциальном виде. Для расчета принимался цилиндрический конфузор с прямолинейной образующей и с углом  $\alpha$  при вершине. Обозначим радиус входного отверстия конфузора через  $r_1$ , а выходного  $r_2$  (рис. 1).

Так как радиус сечения  $r$  конфузора и средняя скорость движения жидкости  $v$  вдоль конфузора являются величинами переменными, то для элементарного отрезка конфузора  $dl$  можно записать следующую формулу для определения потерь напора на трение по длине:

$$dh_{mp} = \lambda \frac{dl}{2r} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения, который при турбулентном режиме движения в диапазоне  $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$  для напорных трубопроводов

рекомендуется определять по формуле П. К. Конакова [4];  $v$  – средняя скорость в произвольно взятом сечении радиусом  $r$ ;  $dl$  – элементарная длина участка образующей конфузора, величина которой определяется из прямоугольного треугольника  $ABC$  (рис. 1) по формуле

$$dl = \frac{dr}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

где  $dr$  – приращение радиуса конфузора на бесконечно малом расстоянии  $dl$  между его живыми сечениями.

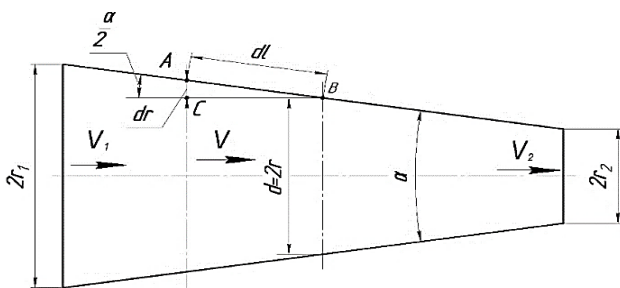


Рис. Расчётная схема конфузора, принятая для определения оптимального угла конусности  $\alpha_{opt}$

При расчёте местных потерь напора на плавное сужение используем классическую формулу Вейсбаха [4]:

$$h_{n.c.} = \zeta_{n.c.} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (4)$$

где  $\zeta_{n.c.}$  – коэффициент гидравлического сопротивления на плавное сужение, который в соответствии с рекомендациями [4] можно определить по формуле

$$\zeta_{n.c.} = k_{n.c.} \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (5)$$

где  $k_{n.c.}$  – коэффициент смягчения;  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи; по данным [4]:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n^2}. \quad (6)$$

По графической зависимости  $k_{п.с.} = f(\alpha)$ , полученной А. Д. Альтшулем и А. И. Калицуном [4], используя метод наименьших квадратов, получим следующее выражение для определения коэффициента смягчения:

$$k_{п.с.} = 0,6 \cdot \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \alpha / 2} + 0,13. \quad (7)$$

Выражение (1) для определения полной потери напора на трение в конфузоре с учётом формул (2), (3), (4), (5), (6), (7) запишется в следующем виде:

$$h(\alpha) = \frac{C_{mp}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \left( 0,6 \cdot \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13 \right) \cdot C_n, \quad (8)$$

где  $C_n = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}$ ,  $C_{mp} = B_1 \left[ \frac{0,0582 \cdot (1 - n^4) + \frac{15,886 \cdot (1 - n^{3,5}) \sqrt{r_2}}{\sqrt{A}}}{2,111 \cdot (1 - n^{3,7865}) \cdot r_2^{0,2135}} + \frac{1}{A^{0,2135}} \right]$ .

Для определения оптимального угла конусности  $\alpha_{онм}$ , при котором полные потери напора на трение будут минимальными, исследуем на экстремум выражение (8), решая уравнение  $\frac{dh}{d\alpha} = 0$ . Это уравнение при выполнении условия

$$C_{mp} < 2,0562C_n, \quad (9)$$

имеет в интервале  $(0; 180^\circ)$  единственное решение  $\alpha_{онм}$ .

$$\alpha_{онм} = 2 \arcsin \left( \frac{C_{mp} + 0,0138C_n}{2,07C_n} \right)^{\frac{4}{19}} = 2 \arcsin \left( \frac{C_{mp}}{2,07C_n} + 0,0067 \right)^{\frac{4}{19}}. \quad (10)$$

Если условие (9) не выполняется, то решений нет.

Анализ расчётов по формуле (10) показывает, что для конструктивно обоснованных значений параметров, входящих в формулу (10), условие разрешимости (9) выполняется, а минимальные потери напора и, как следствие, максимальное воздействие струи рабочей жидкости, будет отмечаться при значении угла конусности  $\alpha_{онм} = 39-43^\circ$  [5].

### Литература

1. Бочаров, В. П. Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники / В. П. Бочаров. – Киев: Техник, 1987. – 12 с.

2. Способы очистки металлических поверхностей: пат. №21512, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко; дата публ. 30.12.2017.

3. 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, С. И. Ушев. – Минск: БНТУ, 2016. – 168 с.

4. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

5. Качанов, И. В., Веремеюк В. В., Мойса А. С., А. В. Филипчик. Расчёт оптимального угла конусности конфузора / И. В. Качанов, В. В. Веремеюк, А. С. Мойса, А. В. Филипчик. – Минск: Агропанорама, 2016. – С. 7-10.

УДК 532.59; 627.8

### **О неустановившемся движении потока воды в открытых руслах при эксплуатации гидротехнических сооружений**

Стриганова М. Ю.<sup>1</sup>, Шаталов И. М.<sup>2</sup>, Самедов С. А.<sup>1</sup>, Щербакова М. К.<sup>2</sup>,  
Закерничный В. И.<sup>2</sup>, Капуза М. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

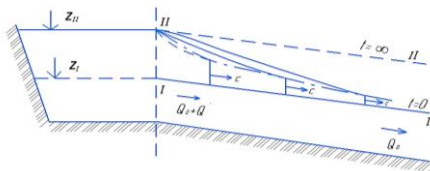
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены уравнения неустановившегося движения потока в открытых руслах, используемые при численном моделировании возникающих волн перемещения.*

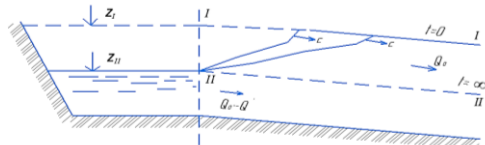
Неустановившееся движение потока воды в открытых руслах (реках и каналах) может возникать при прорыве плотин; в результате маневрирования затворками гидротехнических сооружений (шлюзов, водозаборов, гидроэлектростанций и т.д.); включения и выключения насосных станций. При этом неустановившееся движение в открытых руслах чаще всего принимает форму волны перемещения прямой или обратно, положительной или отрицательной [1].

Волны перемещения в этих случаях имеют строго направленное продольное движение. Поэтому для решения практических задач по волнам перемещения, обычно в инженерном деле рассматривают одномерную модель плавно изменяющегося неустановившегося движения потока воды, при котором в каждом сечении потока: скорость движения воды  $U$  (м/с) равна средней скорости потока; распределение давления гидростатическое.

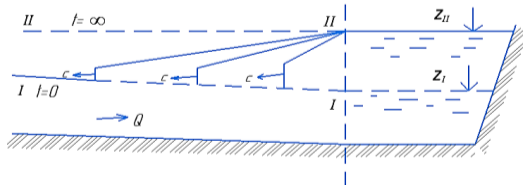
Для теоретического анализа и расчета такого движения обычно принимают плотность воды  $\rho$  ( $\text{кг/м}^3$ ) постоянной, а русло достаточно широким, т.е.  $B \gg h$  (где  $B$ , м – ширина русла по урезу воды;  $h$ , м – глубина потока) и поперечное сечение русла близким к прямоугольной форме, а неустановившееся движение сравнивается с установившимся равномерным движением воды при котором силы трения и поверхность потока уравниваются проекцией силы тяжести, действие которой обусловлено продольным уклоном водотока.



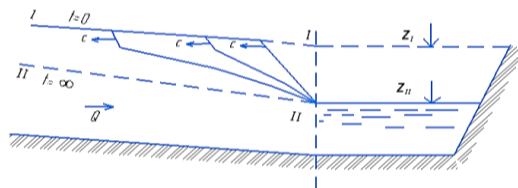
*a – прямая положительная волна, или волна наполнения*



*б – прямая отрицательная волна, или волна отлива*



*в – обратная положительная волна, или волна подпора*



*г – обратная отрицательная волна, или волна излива*

Рис. 1. Неустановившееся движение в открытом русле в виде волны перемещения

Такое неустановившееся движение (рис. 1) в открытых руслах хорошо описывается дифференциальными уравнениями, так называемой мелкой воды, которые можно получить, решив уравнения сохранения массы и изменения количества движения (или уравнение импульса сил). Эти уравнения используя метод контрольного объема [2] можно представить в следующем виде:

1. Уравнение сохранения массы в общем случае можно записать в виде:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \rho U_n dA = 0, \quad (1)$$

где  $\frac{D}{Dt}$  – субстанциональная производная;  $V$  – контрольный объем;  $A$  – контрольная поверхность, ограничивающая контрольный объем  $V$ ;  $t$  – момент времени, изменяющийся до  $t + \Delta t$ .

Поскольку контрольный объем не зависит от времени  $t$ ; плотность воды  $\rho = \text{const}$ ; и площадь поперечного сечения широкого русла равна  $w = Bh$ , уравнение сохранения массы для мелкой воды после преобразований принимает вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial l} h = 0, \quad (2)$$

где  $l$  – длина водотока с некоторым уклоном дна  $i_0$ .

2. Уравнение изменения количества движения в этом случае принимает следующий вид:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho U dV = \int_V \rho f dV + \int_A p_n dA. \quad (3)$$

Спроектировав параметры уравнение (3) на направление движения потока воды и пренебрегая уклоном дна водотока  $i_0$ , запишем уравнение изменения количества движения в виде:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho U_l dV = \int_V \rho f_l dV + \int_A p_n dA. \quad (4)$$

Учитывая выше сделанные допущения, ограничения и предположения, после соответствующих преобразований уравнение изменения количества движения для мелкой воды можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} h + \frac{\partial \mathcal{G}^2}{\partial l} h + gh \frac{\partial h}{\partial l} = 0 \quad (5)$$

или

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} h + \frac{\partial}{\partial l} \left( \mathcal{G}^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = 0 \quad (6)$$



Для теоретического анализа и практического использования дифференциальные уравнения мелкой воды предпочтительнее записывать в виде Эйлеровской системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial l} + h \frac{\partial g}{\partial l} = 0 \\ \frac{\partial g}{\partial t} + V \frac{\partial g}{\partial l} + g \frac{\partial h}{\partial l} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

В общем случае для прямолинейных, нецилиндрических водотоков произвольного поперечного сечения с продольным уклоном  $i_0 = 0$  с учетом вязкости воды система уравнений неустановившегося движения применительно к возникновению волны перемещения приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial l} w = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} g w + \frac{\partial p}{\partial l} g^2 w = \rho g w i_0 - w \frac{\partial p}{\partial l} - \tau_g \chi + \tau_0 B + \frac{\partial}{\partial l} [(P_l^B + P_l^T) w] - \rho g w \frac{\partial h}{\partial l} \end{cases} \quad (8)$$

где  $w = w(l; t)$  – поперечное сечение потока воды;  $\tau_g(l, t)$  – продольные донные касательные напряжения по смоченному периметру поверхности водотока  $\chi$ ;  $\tau_0 = \tau_0(l, t)$  – продольная составляющая касательных напряжений на свободной поверхности, обусловленных ветровой нагрузкой;  $P_l^B$  и  $P_l^T$  – нормальные вязкие и турбулентные напряжения, осредненные по поперечному сечению потока воды.

Приведенные уравнения (7) и (8) могут использоваться при численном (компьютерном) моделировании неустановившегося движения в открытых руслах в виде волн перемещения, а также для определения основных параметров этих волн: средней скорости и глубины, в любой момент времени, например, методом конечных разностей или конечных приращений [3]. При этом все параметры уравнения (8) (кроме искомого  $w = w(l; t)$  и  $v = v(l; t)$ ) должны быть заданы для всех поперечных сечений, включая зависимости  $w = w(h)$  и  $B = B(h)$ .

### Литература

1. Справочник по гидравлике / Большаков В. А. [и др.]; под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Высш. шк. Головное издательство, 1984. – 343 с.
2. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. для ВУЗов / А. Д. Гиргидов. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: изд-во Политехнического университета, 2007. – 545 с.
3. Богомолов, А. И. Гидравлика / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

**Роль глубокого рыхления для преобразование поверхностного стока  
во внутрпочвенный на осушительных системах**

Казьмирук И. Ч.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрены причины неудовлетворительно водного режима слабодопроницаемых почв. Предложены мероприятия по способу осушения и окультуриванию слабодопроницаемых почв, применению более совершенного и технологичного приема рыхления, повышающего водопримную способность закрытой осушительной сети с собирателями. В статье освещается необходимость применени новых конструктивных и технологических решений, увеличивающих положительный эффект от мелиоративных.*

В составе общего земельного фонда Республики находятся и мелиорированные земли сельскохозяйственного назначения, они занимают около 60 %. Мелиорированные сельскохозяйственные земли составляют 2,9 млн. га, из них минеральные – 2 млн. га. Они характеризуются большим разнообразием почвенного покрова, в составе которого преобладают дерновоподзолистые автоморфные и полугидроморфные почвы (71,4 % от общего числа земель сельскохозяйственного назначения) [1]. Качественное состояние минеральных почв определяется не только их генетической принадлежностью, но и гранулометрическим составом почвообразующих пород. Наиболее плодородными являются легко- и среднесуглинистые почвы, характеризующиеся сравнительно устойчивым водным режимом и большими запасами питательных веществ. В республике эти почвы занимают 21,9 % пашни. Наиболее широко они распространены на территории Витебской области, где составляют 49,9 % площади пашни. Реже эти почвы встречаются на пахотных землях Гомельской (3,4 %) и Брестской (2,6 %) областей, где сильно возрастает удельный вес супесчаных и песчаных почв [1]. Важным показателем урожайности сельскохозяйственных земель является их культуртехническое состояние. Минеральные почвы имеют преимущественно атмосферный тип водного питания. Значительная часть мелиоративных систем расположена на минеральных слабодопроницаемых почвах с коэффициентом фильтрации ниже 0,1 м/сут. Содержание илистых и глинистых частиц у них превышает 50 %. Почвы сформированы на суглинистых и глинистых почвообразующих породах – моренных, покровных лёссовидных, озёрно-ледниковых и пермских отложениях под влиянием процессов подзоло- и глееобразования. Преимущественно это дерново-подзолистые глеевые и глееватые почвы. По

гранулометрическому составу – легкие, тяжелые и лессовидные суглинки, подстилаемые глинами. После снеготаяния в период половодья или обильных осадков в период паводка наблюдается застаивание гравитационной влаги на поверхности почвы, это затрудняет применение техники при сельскохозяйственных работах. Основные причины избыточного увлажнения – это замедленный поверхностный сток из-за особенностей рельефа, западный или безуклонный, а также повсеместное залегание с поверхности слабопроницаемых почв.

Реконструкция дренажа является основным мероприятием в Республике Беларусь по восстановлению работоспособности мелиоративных систем. Она должна основываться на применении новых конструктивных элементов, увеличивающих положительный эффект от мелиоративных мероприятий, а также применении более совершенных технологических приемов обработки почвы. Основным конструктивным элементом существующих мелиоративных систем на слабопроницаемых грунтах является закрытый горизонтальный дренаж. Он может выступать как самостоятельный элемент осушительной системы, а также быть дополненным водопоглощающими устройствами различных конструкций (собираателями поверхностного стока)..

Зачастую работоспособность дренажа в слабопроницаемых грунтах напрямую зависит от водопроницаемости засыпки дренажной траншеи, через которую избыточные поверхностные воды поступают в полость дренажной трубы. Установлено, что с течением времени происходит снижение водопроницаемости засыпки вследствие ее уплотнения, образования водонепроницаемой прослойки у подошвы пахотного слоя, вследствие кольматации верхнего слоя засыпки, при этом снижается эффективность работы дренажа. Наиболее интенсивно уплотнение происходит в первый год после строительства дренажа. Причиной переувлажнения корнеобитаемого слоя почвы и образования слабопроницаемой прослойки является результат сельскохозяйственной обработки полей, уплотнение грунта ниже глубины вспашки с образованием избыточно уплотненной подпахотной прослойки, «плужной подошвы». Прохождение тяжелой колесной техники отрицательно сказывается на работе дренажных систем, вследствие переуплотнения фильтрующей засыпки траншеи.

Весной во время таяния снега на поля во взвешенном состоянии вместе с водой приносится огромное количество илстых частиц, которые проникают в пространство между частицами фильтрующей засыпки. Образуется слабопроницаемая зона на границе пахотного слоя и фильтрующей засыпки, т.к. илстые частицы разжиженного грунта пахотного слоя проникает в пространство между комьями разрыхленного грунта фильтрующей засыпки, где, постепенно осаждаюсь, закупоривают поровое пространство в фильтрующей засыпке траншеи. Одновременно с этим в водонасыщенном состоянии почва

под влиянием собственной тяжести оседает, придавливается, вследствие чего подпахотные горизонты до глубины воздействия воды уплотняются, снижется их проницаемость.

В результате уплотнения увеличивается объемная масса почвы, уменьшается количество пор и требуются дополнительные усилия при ее обработке, снижается общая и капиллярная пористость плодородного слоя. Повышение плотности и твердости почвы ведет к длительному застою воды на поверхности, несвоевременному ее отводу в дренажную сеть, вызывая переувлажнение посевов, а порой и их гибель, также создает препятствия для прохождения сельскохозяйственной техники в период ухода за посевами и нарушает сроки их уборки, и, в конечном итоге, ведет к недобору урожая.

Если дренажная траншея засыпана вынутым грунтом, а не фильтрующей засыпкой, имеющей больший коэффициент фильтрации, то в этом случае проведение глубокого рыхления будет способствовать накоплению влаги в почве и ухудшению мелиоративной обстановки, особенно в понижениях. Исходя из этого рекомендуется проводить глубокое рыхление на слабоводопроницаемых грунтах только при наличии собирателей поверхностного стока на дренаже, либо исключать понижения из карты рыхления.

Рыхление проводится прерывистыми полосами. Проведение рыхления перпендикулярно дренам не всегда возможно, т.к. дрены могут иметь различные углы сопряжения с коллектором, особенно при двусторонней компоновке или при устройстве выборочного дренажа.

Повышение интенсивности отвода избыточных поверхностных вод на слабopоницаемых грунтах в дренажную сеть может быть достигнуто путем устройства в дренажной траншее присыпки из хорошо фильтрующего материала (гравий, песчано-гравийная смесь, керамзит, шлак, древесная щепа, обработанная против гниения, и пр.) с коэффициентом фильтрации более 5 м/сут. Выполнение периодического разуплотнения почвы с помощью глубокорыхлителей с постоянным увеличением глубины рыхления исключает образование повторной плужной подошвы. Периодически изменяемый отступ от бровки канала позволяет избежать переуплотнения зон в междуследье. Первое рыхление следует проводить не ранее 6-8 месяцев после устройства дренажа для того, чтобы фильтрующая засыпка обседела.

Глубокое рыхление является одним из эффективных приемов вовлечения плотных подпахотных слоев в сельскохозяйственный оборот, поскольку корни сельскохозяйственных культур могут проникать в почву на 2 метра и более. Такой способ позволяет увеличить расстояние между дренами-собирателями в два раза по сравнению с систематическим дренажем. Данный способ ведет к увеличению интенсивности осушения и улучшению водно-физических свойств почвы, что создает благоприятные условия для

беспрепятственного и свободного развития корневой системы растений, способствует получению высоких урожаев.

Строительство дрен рекомендуется проводить в конце лета – начале осени. Глубокое рыхление проводят в весенний период, когда почва уже достаточно просохла для прохождения рыхлителей, а подстилающий грунт находится в мягко-пластичном состоянии. Рыхление желательно проводить параллельно склону или в направлении против уклона. При проведении рыхления величина угла между дренажной траншеей и направлением рыхления не имеет существенного значения, поскольку дрены на участке в системах различных коллекторов могут иметь различное направление. Рыхление же проводится, главным образом, параллельно открытым каналам-водоприемникам. Проводить рыхление подпахотного слоя почвы по полосам в виде циклов с постоянной глубиной рыхления внутри цикла и увеличением глубины рыхления с каждым новым циклом рекомендуется раз в 2-3 года одновременно со вспашкой дренированного участка. Внутри цикла при каждой новой операции полосы рыхления предлагается смещать в плане относительно предыдущих. Будет происходить разрушение слабопроницаемой зоны на границе пахотного слоя и фильтрующей засыпки, что увеличит ее водопроницаемость.

В междуренье будет рыхлиться слабопроницаемая прослойка ниже глубины вспашки. Для того чтобы при периодическом рыхлении внутри цикла происходило смещение в плане полос рыхления, предлагается перед каждым новым рыхлением увеличивать отступ от бровки канала на величину, равную половине расстояния между рыхлителями. Поскольку после каждого цикла рыхления будет происходить образование новой слабопроницаемой прослойки на границе предыдущего рыхления и фильтрующей засыпки, то в каждом новом цикле рыхления предлагается увеличивать его глубину на 5-8 см для разрыхления вновь образовавшейся прослойки. Таких циклов может понадобиться 4-5 до окультуривания дренированного участка и очередной реконструкции мелиоративной системы. Дойдя до максимально возможной глубины циклы повторяют сначала. Периодическое рыхление подпахотных слоев возможно обычными рыхлителями. Количество рыхлителей определяется видом плуга и используемой тянущей машины. Предлагаемый способ рыхления приведен на рисунке.

Поскольку фильтрующим материалом засыпается обычно не вся траншея, засыпка выполняется дискретно в виде отдельных «окон», то вследствие смещения полос при каждой новой операции рыхления одна или две полосы попадут на каждое «окно».

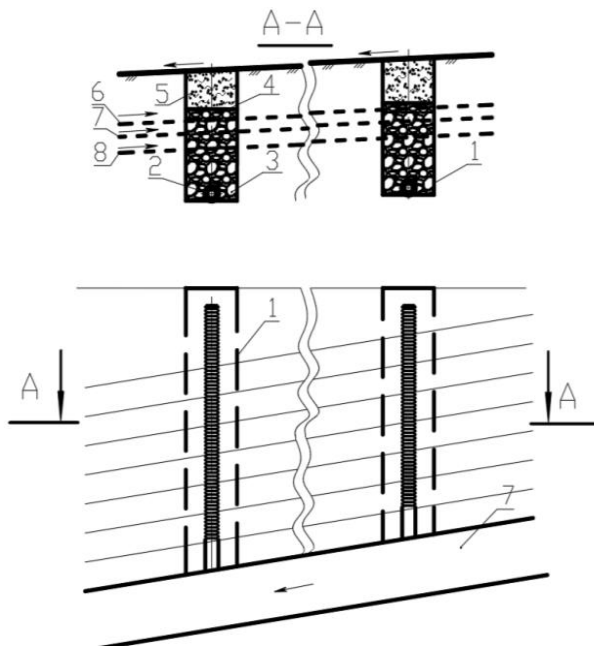


Рис. Способ дренирования грунта:

- 1 – дренажная траншея, 2 – дренажная труба с защитно-фильтрующим материалом, 3 – фильтрующая засыпка траншеи материалом с коэффициентом фильтрации более 5 м/сут, 4 – участок, подверженный интенсивной кольматации, 5 – обратная засыпка траншеи вынутым грунтом, 6 – граница рыхления первого цикла, 7 – граница рыхления второго цикла, 8 – граница рыхления третьего цикла, 9 – водоприемник

Предлагаемый способ рыхления может быть осуществлен землепользователями самостоятельно без привлечения сторонних организаций. Некоторое увеличение расхода горючего вследствие возрастания необходимого тягового усилия при рыхлении вполне себя оправдывает как увеличением урожая, так и улучшением проходимости машин по полю во время весеннего сева и в период уборки урожая.

### Литература

1. Современное состояние почвенноземельных ресурсов Беларуси [Электронный ресурс]: URL: <https://geo.bsu.by/images/pres/soil/kml/kml03.pdf> – Дата доступа 20.05.2020).

**Теоретические и компьютерные исследования дальнобойного  
пожарного лафетного ствола (ДЛС) при ликвидации чрезвычайных  
ситуаций на объектах водного транспорта**

Качанов И. В.<sup>1</sup>, Кудин М. В.<sup>2</sup>, Шаталов И. М.<sup>1</sup>, Кособуцкий А. А.<sup>1</sup>

Щербакова М. К.<sup>1</sup>, Хвилько К. В.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусская государственная академия авиации

Минск, Республика Беларусь

*В статье представлены результаты теоретического и компьютерного исследования дальнобойного пожарного лафетного ствола с обоснованием выбора формы поперечного сечения его проточной части.*

Одним из самых востребованных современных способов активного пожаротушения в любой области хозяйственной деятельности человека, в том числе на водном транспорте, является применение дальнобойных лафетных стволов (ДЛС). На кафедре ГЭСВТГ БНТУ в период 2013–2014 гг. выполнялась НИР ГБ 13-05 «Научное обоснование конструктивных решений, разработка экспериментального отечественного образца дальнобойного лафетного ствола с винтовой структуризацией потока» в рамках задания 2.2.30 ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» по созданию отечественного образца ДЛС.

Для определения оптимальных формы и размеров ДЛС было выполнено компьютерное моделирование проточной части лафетного ствола в прикладном программном пакете «SolidWorks» [1].

При компьютерном моделировании учитывались следующие факторы:

1. проточная часть лафетного ствола должна иметь различную (круглую, прямоугольную и овальную) форму поперечного сечения.
2. из условия статической устойчивости ДЛС проточная часть лафетного ствола должна включать в себя три плавных поворота (колена) на угол  $90^\circ$  и один плавный поворот (колена) на угол  $180^\circ$ .

В результате компьютерного моделирования с учетом вышеизложенных факторов проточная часть круглой, прямоугольной и овальной формы поперечного сечения экспериментального образца дальнобойного пожарного лафетного ствола приобрела формы, изображенные на рис. 1.

Для определения оптимальных параметров ДЛС была создана обобщенная имитационная математическая модель течения несжимаемой вязкой жидкости на основе уравнений Навье-Стокса [2], записанного относительно оси  $Ox$  декартовой системы координат

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + V \cdot \nabla^2 \cdot V_i, \quad (1)$$

где  $\frac{\partial V_k}{\partial x_k} = 0 (i, k = 1, 2, 3)$ .

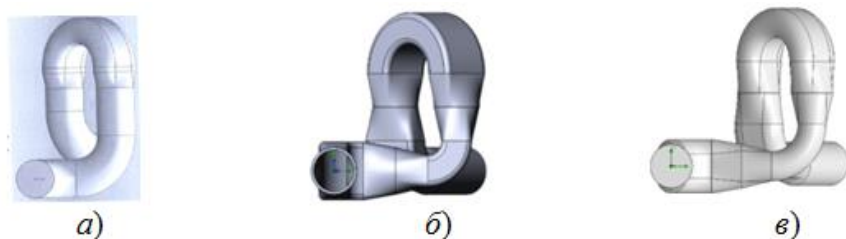


Рис. 1. Компьютерные модели проточной части дальнобойного пожарного ствола с различной формой поперечного сечения:

*a* – круглая, *б* – прямоугольная, *в* – овальная

Совместно с уравнением Навье-Стокса рассматривались следующие уравнения:

1. Уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot V = 0$$

2. Уравнение диссипации энергии

$$\rho \frac{d}{dt} \left( U + \frac{V^2}{2} \right) = \rho FV + \text{div}(pV) + \rho q. \quad (2)$$

Для создания сетки расчетной области и проведения численных расчетов использовался программный продукт по вычислительной гидродинамике «Cosmos Flo Works» [1, 2].

Некоторые результаты моделирования и гидродинамических расчетов представлены на рис. 2. Физическая сущность сопротивления в изогнутых гидравлических каналах (трубах) заключается в следующем. В изогнутых каналах (трубах) скорость движения жидкости изменяет свое направление, что сопровождается искривлением линий тока и появлением центробежных сил, приводящих к тому, что по направлению от центра кривизны давление увеличивается, а скорость соответственно падает и, наоборот, по направлению к центру кривизны скорость возрастает, а давление падает. Поэтому в коленах и отводах при переходе жидкости из прямолинейного участка в изогнутый скорость вблизи внутренней стенки повышается (рис. 2), а давление соответственно уменьшается, т.е. возникает конфузурный эффект.



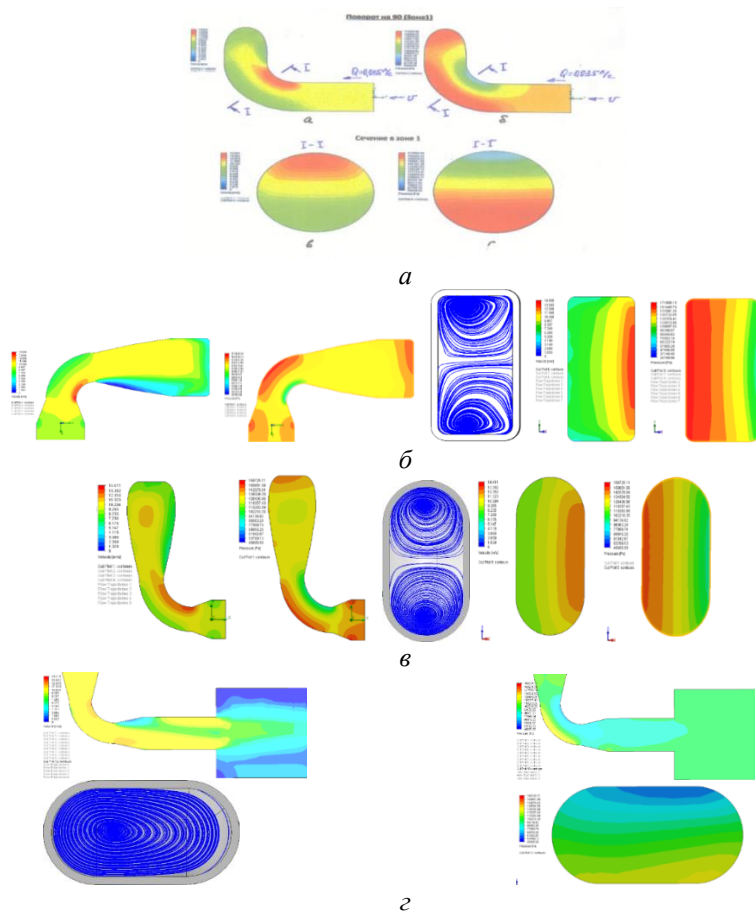


Рис. 2. Диаграммы распределения скоростей и давлений проточной части ДПС различной формы поперечного сечения:  
*а* – круглая форма поперечного сечения, *б* – прямоугольная форма поперечного сечения, *в, з* – овальная форма поперечного сечения

Вблизи внешней стенки колена происходит обратное явление: скорость падает, а давление растет, т.е. возникает диффузорный эффект. Переход жидкости из изогнутой части в прямолинейный участок (после поворота потока) сопровождается противоположными явлениями: диффузорным эффектом вблизи внутренней стенки и конфузорным вблизи внешней стенки. Диффузорные явления приводят к соответствующему отрыву потока от обеих

стенок. Отрыв от внутренней стенки усиливается стремлением потока по инерции двигаться прямолинейно, в данном случае – по направлению к внешней стенке.

Вихревая зона, возникающая вследствие отрыва потока от внешней стенки, незначительна: она заполняет только внешний угол поворота, не стесняя заметно сечения основного потока. Наоборот, отрыв от внутренней стенки приводит к интенсивному вихреобразованию, зона которого распространяется далеко за изгибом канала.

Помимо вихревых областей у внутренней и внешней стенок, в изогнутом канале возникает ещё так называемый «парный вихрь» (рис. 2), Появление этого вихря обуславливается наличием пограничного слоя и, соответственно, ядра потока с максимальными скоростями.

В результате проведенного компьютерного моделирования можно сделать вывод, что структура потока и сопротивление изогнутых каналов определяется тремя явлениями: образованием вихревой области у внутренней стенки поворота, образованием такой же области у внешней стенки и возникновением «парного вихря» в поперечном сечении канала.

Теоретическое и компьютерное моделирование показало, что существенно снизить гидравлическое сопротивление проточной части лафетного ствола можно за счет исчезновения «парного вихря» путем изменения формы поперечного сечения. При этом наиболее оптимальной формой является овальная форма поперечного сечения с соотношением осей овала 1:2(3) (причем большая ось направлена в сторону кривизны плавного поворота (колена), в которой «парный вихрь» практически исчезает (рис. 2, з), что приводит к снижению гидравлического сопротивления до 1,5 раз.

### Литература

1. Ахметов, Ю. М. Численное и физическое моделирование течения жидкости в вихревом теплогенераторе / Ю. М. Ахметов, Р. Р. Калумлин, В. А. Целищев. – Уфа: Вестник УГАТУ «Машиностроение», т.14 № 4 (39). – 2010. – С. 42–49.
2. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.

**К вопросу об использовании конической насадки в водометных двигателях мелкосидящих буксирных теплоходов (МБТ)**

Афанасьев А. П.<sup>1</sup>, Шаталов И. М.<sup>2</sup>, Качанов И. В.<sup>2</sup>, Кособуцкий А. А.<sup>2</sup>,  
Ленкевич С. А.<sup>2</sup>, Щербакова М. К.<sup>2</sup>, Ковалевич В. С.<sup>2</sup>, Рапинчук Д. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Белсудопроект»

Гомель, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

*В статье приводится обоснование применения конической насадки в водометных двигателях мелкосидящих теплоходов (МБТ) проекта 570 (730).*

При эксплуатации мелкосидящих судов, например, буксирных теплоходов проекта 570 и 730, на реках и каналах Республики Беларусь возникают затруднительные ситуации при прохождении этими судами мелководных и извилистых участков рек. В этом случае возможно появление двух основных отрицательных эффектов при эксплуатации судна:

- посадка судна на дно реки на участке мелководья;
- достаточно резкое падение скорости движения на извилистых участках рек из-за отсутствия надлежащей тяги водометного двигателя.

В первом случае для устранения отрицательного эффекта можно использовать днищевую воздушную каверну. Во втором случае для увеличения тяги водометного двигателя предлагается использовать конически сходящуюся насадку (конфузор) 2, которую необходимо установить между водометной трубой с гребным винтом 1 и рулевым устройством 3 МБТ (рис. 1).

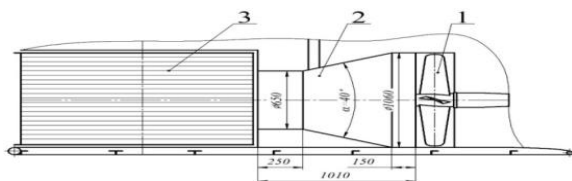


Рис. 1. Струеформирующая насадка между водометной трубой и рулем МБТ

При движении судна вода попадает на рабочее колесо (гребной винт), где ускоряется лопастями рабочего колеса.

Далее поток воды поступает в спрямляющий аппарат, где изменяет направление так, чтобы уменьшить потери энергии, вызванные закруткой

потока на гребном винте. Затем поток воды поступает в сужающиеся сопло (конически сходящийся насадок), которое позволяет в 1,1–1,2 раза увеличить тягу водометного движителя.

Сужающееся сопло конфузора для увеличения тяги может быть выполнено (по данным теоретических и лабораторных гидравлических исследований, проведенных на кафедре ГЭСВТГ БНТУ), с углом конусности в пределах 39–43° (среднее значение 40–41°) [1].

Поток воды, проходя через такое сужающее сопло, плавно сжимается, увеличивая свою скорость более чем в два раза. При увеличении скорости движения потока воды попутно увеличивается количество движения и возникает импульс реактивной силы, направленный в сторону движения судна, который далее увеличивает тягу водометного движителя.

При использовании струеформирующего конфузора на гребном винте буксира проекта 570 (или 730) входной диаметр предлагаемого конического насадка (конфузора) выполняется диаметром 1060 мм, выходной диаметр – 650 мм.

Тогда используя уравнение неразрывности и сплошности потока и теорему изменения количества движения (или импульса силы) можно оценить порядок величины реактивной силы и степень увеличения тяги судна.

При установившемся движении воды через гребной винт, т.е. при  $Q = \text{const}$ , можно записать уравнения неразрывности и сплошности потока и изменения количества движения для конфузора в виде

$$Q_1 = Q_2 = Q = \text{const} \text{ или } v_1 S_1 = v_2 S_2, \\ m v_1 - m v_2 = \Delta R t$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – средние скорости в начале и в конце конфузора;  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечного сечения в начале и в конце конфузора;  $Q_1$  и  $Q_2$  – объемный расход в конфузоре, равный  $Q = \text{const}$ ;  $m$  – масса воды, проходящей через гребной винт и конфузор;  $R \Delta t$  – импульс реактивной силы.

Решение системы этих уравнений позволяет оценить порядок величины реактивной силы и степень увеличения тяги буксирного теплохода проекта 570(730). Для этого преобразуем уравнение импульса

$$m v_1 - m v_2 = R \Delta t.$$

Учитывая, что  $\frac{m}{\Delta t} = M$  – массовый расход воды, который можно выразить в виде

$$M = \rho Q,$$

это уравнение запишем следующим образом:

$$\rho Q v_1 - \rho Q v_2 = R,$$

где  $R$  – реактивная сила, увеличивающая тягу судна;  $\rho$  – плотность воды.

Выразим скорость  $v_2$  через  $v_1$ , используя уравнение неразрывности

$$v_2 = v_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} = v_1 \left( \frac{D}{d} \right)^2,$$

где  $D$  – больший диаметр конфузора;  $d$  – меньший диаметр конфузора.  
В результате получим

$$v_2 = v_1 \left( \frac{106}{65} \right)^2 = v_1 \cdot 2,66.$$

С учетом этого соотношения можно записать

$$\rho Q v_1 (1 - 2,66) = R, \quad R = -1,66 \rho Q v_1,$$

т.е. использование конически сужающегося насадка конфузора теоретически может увеличить тягу судна приблизительно на 60-70 %. Знак «-» говорит о том, что реактивная сила направлена в сторону движения судна, т.е. действует противонаправлено по отношению к струе, вытекающей из насадки конфузора.

Эксперимент, проведенный в гидравлическом лотке кафедры ГЭСВТГ, показал, что при использовании сопла с углом конусности  $\alpha = 40-41^\circ$  тяга водометного двигателя примерно увеличивается на 10-20 % из-за механических, гидравлических и тепловых потерь при работе водометного двигателя.

### Литература

1. Качанов, И. В. Расчет оптимального угла конусности, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов, И. М. Шаталов, А. Н. Жук, В. В. Верременюк, А. В. Филлипчик // Наука и техника. – 2019. – Т.18, №3. – С. 216 – 222.

УДК [574+504] (576)

### Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга берегов и верховых откосов сооружений водохранилищ

Левкевич В. Е.<sup>1</sup>, Бузук А. В.<sup>2</sup>, Касперов Г. И.<sup>3</sup>,  
Мильман В. А.<sup>4</sup>, Решетник С. В.<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>4</sup>Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

*В настоящей статье приведены результаты исследований по оценке деформаций естественных берегов и состояния эксплуатируемых сооружений берегозащиты и креплений откосов подпорных сооружений на водохранилищах Беларуси с помощью средств дистанционной диагностики. На*

*основе анализа и опыта использования современных технологий обработки спутниковой информации, методов и средств дистанционной диагностики – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – получены выводы и даны некоторые концептуальные предложения по ведению мониторинга береговой зоны водных объектов.*

Водохранилища представляют собой сложные природно-технические комплексы. Создаваемые на базе рек и озер водные объекты наряду с положительным эффектом оказывают отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Наиболее опасные проявления этого – абразия естественных берегов и деформации незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин и креплений различного типа. В результате развития указанных отрицательных процессов происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, разрушение селитебных территорий, нарушение условий жизнедеятельности населения, что приносит значительный ущерб народному хозяйству государства. В настоящей работе приведены некоторые результаты исследований, целью которых явились

- разработка предложений по мониторингу деформаций берегов, состоянию ограждающих сооружений водных объектов, водозаборов и очистных сооружений на основе данных дистанционного зондирования;
- оценка возможности комплексного использования технологии и применения систем обработки космических и авиационных снимков, а также сведений беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных съемок для решения задач мониторинга природных процессов и прикладных задач, связанных с эксплуатацией сооружений.

Комплексное совместное натурное обследование ряда водохранилищ Беларуси и сооружений на них с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), проводимых Белорусским национальным техническим университетом, Объединенным институтом проблем информатики НАН Беларуси и другими организациями позволило установить нарушения в состоянии и дефекты инженерной защиты берегов водохранилищ [1, 2].

Практика показала, что использование дистанционных методов обеспечивает одновременную (в расчете на масштаб процесса) съемку большого района береговой зоны и контроль ее состояния (размер поля съемки в несколько квадратных километров) при небольшом временном смещении. Эти методы на основе высокого информационного содержания материалов космической съемки позволяют получать как топографические, так и тематические карты прибрежных территорий. Например, снимки с МКС с высоты около 250 км (масштаб оригинала М 1:2000000) в четырех спектральных диапазонах видимого излучения (от 460 до 680 нм) дают разрешение на поверхности Земли, равное около 10 м для линейных объектов. Вследствие высокой

метрической точности многозональные снимки можно относительно просто совмещать с существующими картами. Таким образом, имеется возможность постоянного обновления различных серий карт и баз данных (например, базы данных кадастра берегов).

Определено, что для мониторинга берегов водохранилищ и ограждающих сооружений (дамб) должны выделяться репрезентативные участки прибрежной и береговой территории. При выборе характерных репрезентативных участков учитываются геологические, морфологические и гидрологические особенности береговых склонов, причем при выборе участков наблюдений применялся предложенный нами комплексный критерий однородности выборки контрольных створов [1], структура которого

$$P_r = \left\{ \text{Тип} \left[ \text{Подтип} (\text{Форма склона}) \right] \right\}$$

где  $P_r$  – комплексный безразмерный критерий, позволяющий учитывать пространственную однородность фрагментов участков береговой линии, необходимую при проведении сравнительного анализа объектов мониторинга. Протяженность участков может быть различной. Опытным путем установлено, что наилучшим периодом проведения наблюдений является весна или же период предледоставный (октябрь–ноябрь). Информация, полученная в результате съемок по каждому объекту, после обработки заносится в базы данных, что позволяет в дальнейшем производить корректировку ретроспективных прогнозов.

Дистанционная диагностика с использованием современных БПЛА облегчает и ускоряет процесс мониторинга прибрежной зоны водохранилищ, а крупномасштабная съемка наиболее удобна для оценки и инвентаризации состояния откосов подпорных сооружений и их креплений (рис. 1).



Рис. 1. Деформации верхних откосов ограждающей дамбы



Рис. 2. БПЛА – квадрокоптер модели DJI Phantom 3 Professional

В осенний период 2019 г. была экспериментально апробирована методика регистрации деформации береговых склонов и оценки состояния дамб обвалования, а также их крепления с помощью легкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – квадрокоптера. Используемый квадрокоптер модели DJI Phantom 3 Professional оснащен системой позиционирования GPS и позволяет получать видео и фото HD качества в он-лайн режиме (рис. 2).

Один из снимков участка разрушаемого берега, полученный с использованием видеокамеры высокого разрешения БПЛА, приведен на рис.3. В процессе натурного эксперимента были проведены съемки береговой линии Заславского водохранилища протяженностью около 2000 м, ограждающих дамб польдеров и их откосов.



Рис. 3. Заславское водохранилище. Юго-западный берег. Участок № 4.  
Поперечники № 1-3.

На переднем плане – сформированный поток наносов. Высота съемки 50 м



Полученные данные и материалы съемок позволили заключить, что:

- регистрация и наблюдение за развитием процесса разрушения естественных берегов водохранилищ и креплений откосов дамб и плотин с помощью БПЛА возможны и рекомендуются для использования в Беларуси;
- возможно получение необходимых и достаточных точных измерений линейных деформаций склонов и откосов дамб и плотин, а также их креплений с помощью БПЛА;
- для оценки влияния водных объектов на прилегающие территории может использоваться комбинированная съемка с интеграцией на основе ГИС-систем: спутниковая высокого разрешения, беспилотными летательными аппаратами и наземная.

### Литература

1. Левкевич, В. Е. Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2018. – 143 с.
2. Левкевич, В. Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: БНТУ, 2019. – 172 с.

УДК 627.824

#### **Условия разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень**

Богославчик П. М., Евдокимов В. А., Немеровец О. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основе совместного рассмотрения формулы критических скоростей с гидравлическими параметрами потока разработана расчетная схема определения времени начала разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень. Схема привязана к напору на гребне размываемой плотины, что очень удобно при расчете размыва.*

В предложенной ранее методике расчета размыва грунтовой плотины при переливе воды через гребень [1] предполагается, что размыв начинается сразу же с началом перелива. На практике же на низовом откосе всегда имеется крепление, которое разрушается не сразу, а некоторое время сопротивляется размыву. Схема перелива представлена на рис.

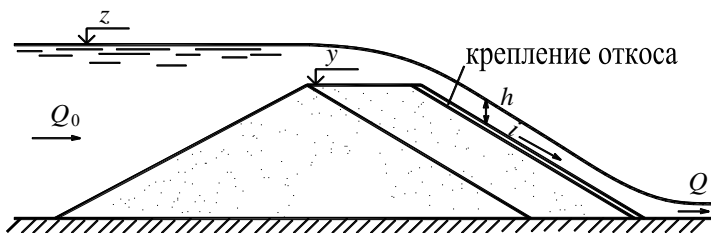


Рис. Схема перелива воды через гребень грунтовой плотины

Для определения времени начала разрушения крепления воспользуемся в качестве исходной формулой критических скоростей [2], которая имеет следующий вид

$$u_{\text{н}} = \sqrt{\frac{2h \cos^2 \gamma \cdot \text{tg} \varphi (1 - m')^2 g}{\lambda}}, \quad (1)$$

где  $u_{\text{н}}$  – критическая скорость, т.е. скорость потока, при которой начинается разрушение крепления, м/с;  $h$  – глубина потока, м;  $\gamma$  – угол наклона касательной к поверхности откоса относительно горизонта;  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, подстилающего крепление;  $m'$  – пористость крепления;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления, определяется по формуле

$$\lambda = \frac{8n_{\text{кр}}^2 g}{2,25h^{0,33}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{кр}}$  – коэффициент шероховатости крепления по Маннингу, рекомендуется принимать [2] для дерна – 0,03, для кустарниковой растительности – 0,1, для бетона – 0,015.

Подставляя (2) в (1), получаем

$$u_{\text{н}} = A_1 h^{0,67}, \quad (3)$$

где

$$A = \sqrt{\frac{0,5625 \cos^2 \gamma \cdot \text{tg} \varphi (1 - m_{\text{кр}})^2}{n_{\text{кр}}^2}}. \quad (4)$$

Допускаем, что кривая спада на откосе короткая и там устанавливается нормальная глубина. Определим ее из уравнения Шези-Маннинга, которое для условий плоской задачи имеет вид

$$q = hC\sqrt{hi}, \quad (5)$$

где  $C$  – коэффициент Шези,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}, \quad (6)$$

где  $q$  – удельный расход, м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле водослива с широким порогом

$$q = m \sqrt{2g} (z - y)^{1,5}, \quad (7)$$

где  $m$  – коэффициент расхода;  $z$  – уровень верхнего бьефа, м;  $y$  – отметка гребня плотины, м.

Из уравнения (5) с учетом (6) и (7) получаем

$$h = \frac{m \sqrt{2g} (z - y)^{1,5} n_{кр}}{i^{0,3}}, \quad (8)$$

где  $i$  – уклон поверхности откоса,  $i = 1/m_n$ ,  $m_n$  – коэффициент заложения низового откоса.

Подставляя (8) в (3), получим следующее выражение для критической скорости

$$u_H = A_1 (z - y), \quad (9)$$

где

$$A_1 = 0,75 m^{0,67} \cos \gamma \sqrt{\operatorname{tg} \varphi (1 - m_{кр})} \cdot \sqrt[3]{\frac{2g}{n_{кр} i}}, \quad (10)$$

Скорость потока на откосе определим по уравнению Шези

$$u = C \sqrt{hi} \quad (11)$$

С учетом (6) и (8) получим следующее выражение:

$$u = A_2 (z - y)^{0,12}, \quad (12)$$

где

$$A_2 = \frac{i^{0,5}}{n_{кр}} \left( \frac{n_{кр} m \sqrt{2g}}{i^{0,3}} \right)^{0,08}. \quad (13)$$

Таким образом, получены выражения для определения критической скорости, при которой начинается разрушение крепления, и скорости на откосе в зависимости от напора на гребне размываемой плотины, то есть  $u_H = f(z - y)$  и  $u = f(z - y)$ . Уравнения движения потока для рассматриваемого случая имеет вид [1]

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q}{F}, \quad (14)$$

где  $Q_0$  – расход воды в верхнем бьефе, м<sup>3</sup>/с;  $Q$  – расход воды через размываемую плотину, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь зеркала воды в верхнем бьефе, м<sup>2</sup>.

Решая совместно уравнения (3), (12) и (14) по методике, изложенной в [1], можно получить время разрушения крепления, то есть время начала размыва плотины с начала перелива.

## Литература

1. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. – 2018. – № 4. С. 292–296.
2. Иванов, Н. А. Защита низовых откосов плотин из грунтовых материалов при кратковременном переливе / Н. А. Иванов // Гидравлика и фильтрация: сб. научн. трудов Гидропроекта. – М., 1979. – С. 87–94.

УДК 626.8

### **Исследование технического состояния шлюза-регулятора на реке Морочь**

Круглов Г. Г., Линкевич Н. Н.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Приведены результаты исследований технического состояния конструктивных элементов шлюза-регулятора на р. Морочь. Выявлено их техническое состояние, наличие различного рода дефектов и разрушений. Даны рекомендации по ремонту и реконструкции.*

Важной задачей при эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе низконапорных, является обеспечение надежности и безопасности их функционирования. При этом аварийность низконапорных ГТС выше, чем для высоко- и средненапорных. Это объясняется неудовлетворительным уровнем технического обслуживания ГТС, отсутствием или недостаточным штатом эксплуатационного персонала, не выделением необходимых средств для ремонтных работ, а в ряде случаев потерей собственника и эксплуатирующей организации. Под низконапорными ГТС, согласно ТКП 45-3.04-169-2009, понимаются ГТС IV класса с напором до 15 м и объемом водохранилища до 50 млн м<sup>3</sup>.

Большинство низконапорных ГТС эксплуатируются более 50 лет, что неизбежно сказывается на ухудшении их технического состояния и соответственно надежности и безопасности. Из-за отсутствия должного контроля к безопасности низконапорных ГТС IV класса и, особенно бесхозяйных ГТС, эффективность работы с этой категорией сооружений остается или недостаточной, или даже низкой. К таким ГТС относятся шлюзы-регуляторы, представляющие определенную опасность для населенных пунктов, хозяйственных объектов и сельскохозяйственных полей, поскольку так же, как и грунтовые плотины, создают напорный фронт. Оценка состояния объектов потенциальной опасности требует наличия объективной информации о техническом состоянии упомянутых сооружений.

Методика натурных обследований составлена на основании опыта проведения подобных работ, обзора и анализа литературных источников [1-5]. Обследования бетонных конструкций велись визуальными и неразрушающими методами. Визуальные обследования являются основным способом контроля за состоянием сооружений, и данные этих наблюдений становятся базой для дальнейших инструментальных обследований.

Обследования проводились группой, результаты сопоставлялись, и все обнаруженные дефекты и повреждения повторно проверялись. Записи и фотографирование проводились непосредственно на месте.

В состав работ, выполняемых в рамках натурных обследований, включены:

- изучение технической документации;
- обследование общего состояния сооружений и их элементов;
- установление повреждений и дефектов отдельных конструкций сооружений;
- выявление причин, вызывающих повреждения конструкций;
- определение прочностных свойств бетонных конструкций;
- разработка рекомендаций по устранению выявленных дефектов и повреждений.

В результате изучения технической документации получены следующие материалы: проектная и другая техническая документация; данные о предшествующих обследованиях или исследованиях, принятых решениях, связанных с ремонтом или реконструкцией, и их выполнении; сведения о несоответствии в материалах разных лет; документация, которую необходимо восстановить.

Река Морочь протекает по территории Минской области и является правым притоком реки Случь. Длина реки 150 км, площадь водосборного бассейна 2030 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды в устье 8,7 м<sup>3</sup>/с. На реке расположено Краснослободское водохранилище. Наивысший уровень половодья в конце марта, средняя высота уровня воды над меженным 2,4 м, наибольшая – 2,9 м.

Шлюз-регулятор (рис. 1) возведен на пикете 313+30. Его конструкция базируется на типовом проекте ШРА 3,5-4×5,5. Шлюз имеет четыре водосливных пролета шириной 5,5 м каждый и высотой 3,0 м. Напорные грани быков облицованы металлом.

Техническое состояние бетонных конструкций шлюза-регулятора в целом удовлетворительное, но вышел из строя и не работает подъемник затворов. Один из рабочих затворов поднят из водосливного отверстия и находится на берегу в нерабочем состоянии. Перильное ограждение служебного мостика напротив этого водосливного пролета отсутствует, что создает опасность для жизни пешеходов. Русло реки Морочь в верхнем и нижнем бьефах

на обоих берегах сильно заросло и заболочено. Плиты крепления заросли, и оценить их техническое состояние затруднительно (рис. 1). На отдельных бетонных конструкциях есть каверны, разрушены стыки (рис. 2). В зоне примыкания левобережного устоя к берегу отмечены осадки и провалы грунта.



Рис. 1. Вид на шлюз-регулятор с верхнего и нижнего бьефов

Прочность на сжатие бетонных конструкций шлюза-регулятора определена с помощью «Измерителя прочности бетона ИПС-МГ4.03» и составила больше 20 МПа, что соответствовало или было выше марки бетона М200, которая является допустимой для конструкций подпорных гидротехнических сооружений. Прочность бетона менее 20 МПа получена только для плиты крепления правого берега в нижнем бьефе шлюза-регулятора.



Рис. 2. Правобережная стенка камеры шлюза-регулятора:

*а* – со стороны нижнего бьефа, *б* – левобережный открылок берегового устоя в нижнем бьефе

Сегодня в Республики Беларусь существует опасность возникновения риск-ситуаций на гидротехнических сооружениях. Полноценный контроль за состоянием сооружений, особенно местных и локальных, практически отсутствует. Одним из возможных подходов для решения проблемы контроля может явиться мониторинг состояния гидротехнических сооружений. Для реализации этой задачи разработана методика натуральных обследований

гидротехнических сооружений, которая должна выполняться поэтапно с учетом специфики объектов.

В качестве основных мероприятий по ремонту и реконструкции шлюза-регулятора на реке Морочь рекомендуются проведение ремонтных работ и реконструкция шлюза-регулятора, несмотря на то, что техническое состояние бетонных и железобетонных конструкций удовлетворительное. Подъемные устройства для маневрирования рабочими затворами необходимо демонтировать и заменить на новые. Пазовые конструкции и рабочие затворы необходимо отремонтировать, очистить от ржавчины и нанести антикоррозийные покрытия. В рабочих затворах заменить боковые и донные уплотнения. Оголенную арматуру на всех конструкциях шлюза-регулятора следует зачистить от ржавчины и нанести защитный слой бетона. Ремонт дефектов бетонных конструкций (трещины, каверны, сколы и т. д.) можно выполнить зачисткой места повреждения до здорового бетона, зачеканкой цементно-песчаным раствором с последующим торкретированием или заделкой этих поврежденных цементными смесями "Кальматрон", "Парад", "Эмако" и др. Разрушенные уплотнения стыков сборных железобетонных плит крепления берегов необходимо очистить от мусора и грунта и заполнить бетоном или битумной мастикой. Разрушенные уплотнения температурно-осадочных швов следует очистить, удалить мусор и зачеканить герметиком или битумной мастикой. В местах осадок и провалов грунта в примыкании стенок камер шлюза к берегам необходимо удалить растительный грунт и заполнить провалы песчаным грунтом с последующим тщательным уплотнением.

### Литература

1. Типовая техническая программа обследования гидротехнических сооружений эксплуатируемых электростанций. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1982. – 40 с.
2. Линкевич, Н. Н. Эксплуатация гидротехнических сооружений: учебное пособие / Н. Н. Линкевич, М. В. Нестеров. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 520 с.
3. Круглов, Г. Г. Исследование технического состояния судоходной плотины гидроузла «Стахово» Лунинецкого района Брестской области / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2018. – № 4 (86). – С. 31–37.
4. Круглов, Г. Г. Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилища «Заславское» и мероприятия по предотвращению их разрушения фильтрационным потоком / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2015. – № 1 (73). – С. 160–165.
5. Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения: ТКП 45-1.04-37-2008\* (02250) / Министерство строительства и архитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2014. – 42 с.

**Результаты экспериментальных исследований 3D – моделей корпусов  
мелкосидящих буксирных теплоходов (МБТ)  
в гидродинамической лотке**

Ключников В. А.<sup>1</sup>, Качанов И. В.<sup>1</sup>, Ленкевич С. А.<sup>1</sup>, Афанасьев А. П.<sup>2</sup>,  
Шаталов И. М.<sup>1</sup>, Щербакова М. К.<sup>1</sup>, Ковалевич В. С.<sup>1</sup>, Рапичук Д. В.<sup>1</sup>

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

Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>ОАО «Белсудопроект»

Гомель, Республика Беларусь

*В статье приведены некоторые результаты лабораторных гидродинамических исследований 3D-моделей корпусов мелкосидящих буксирных теплоходов (МБТ). Сделаны выводы и даны рекомендации по снижению гидравлического сопротивления и увеличения подъемной силы.*

При эксплуатации речных судов, например, буксирных теплоходов (МБТ) проекта 570 (или 730), на мелководных и извилистых участках рек возникают сложности с прохождением судами этих участков. На этих участках рек резко уменьшается величина пропульсивного комплекса МБТ, который является основной характеристикой эффективной эксплуатации судов, увеличивается сила сопротивления движению, резко падает тяга водометного двигателя, происходит присасывание судна к дну водотока (реки или канала).

Одной из составляющих силы сопротивления движению судна является сила трения, возникающая в пристеночном слое днищевой части судна и связанная с вязкостью воды. Уменьшить сопротивление трения можно за счет уменьшения смоченной поверхности корпуса судна, либо понижением вязкости воды, омывающей эту поверхность.

Одним из путей уменьшения смоченной поверхности является создание воздушной каверны в днищевой части судна (рис. 1, а), представляющей из себя полость в днище судна, в которой с помощью нагнетателей поддерживается давления газа (чаще воздуха), изолирующего судно от воды.

Снижение вязкости воды в пристеночном слое можно получить за счет создания пузырьковой смазки путем ввода плотной пелены пузырьков под гладкое днище судна через специальные каналы или отверстия (рис. 1, б).

Следует отметить, что у мелкосидящих судов (МБТ) при определенных режимах движения возникает нежелательное явление – присасывание судна к дну, вследствие падения давления под днищевой частью. При создании воздушной каверны под днищевой частью судна это явление исчезает, т.к. при



подаче воздуха возникает вертикальная подъемная сила, что исключает при-сасывание судна к дну водотока.



Рис. 1. Конструкция дна корпуса 3D-модели МБТ:  
*а* – с каверной и трубчато-перфорированной подачей воздуха без скег,  
*б* – с блочно-пакетной подачей воздуха со скегами

Для оценки величины силы сопротивления движению и подъемной силы при движении МБТ проекта 570 (или 730) в гидравлической лаборатории кафедры «ГЭСВТГ» БНТУ были проведены исследования 3D-моделей корпуса МБТ. Экспериментальная установка включала в себя гидродинамический лоток, программно-измерительный комплекс для регистрации усилий, 3D-модель корпуса судна с днищевой каверной и системой подачи воздуха.

В процессе проведения исследований выяснялся вопрос влияния параметров подачи воздуха в днищевую каверну на величину силы сопротивления движения судна и величину подъемной силы.

Исследования проводилась при следующих конструктивных особенностях 3D-модели корпуса МБТ:

- без скег (рис. 1, *а*);
- со скегами переменной высоты: 0,5 см, 1 см (рис. 1, *б*);

Установка скег препятствовала перетеканию нагнетаемого воздуха из днищевой части модели через боковые части корпуса в окружающей поток воды и тем самым позволяла под днищем 3D-модели корпуса судна создать компактную воздушную каверну.

Для каждого из перечисленных вариантов подача воздуха в днищевую часть модели производилась двумя способами:

- при помощи блочно-пакетной конструкции (рис. 2);
- при помощи трубчато-перфорированной конструкции (рис. 3).

Исследования проводились при скоростях потока  $V = 0,26$  м/с и  $V = 0,53$  м/с. Основные результаты исследований представлены на рис. 4–5.



Рис. 2. Блочно-пакетная конструкция подачи воздуха



Рис. 3. Трубчато-перфорированная конструкция подачи воздуха

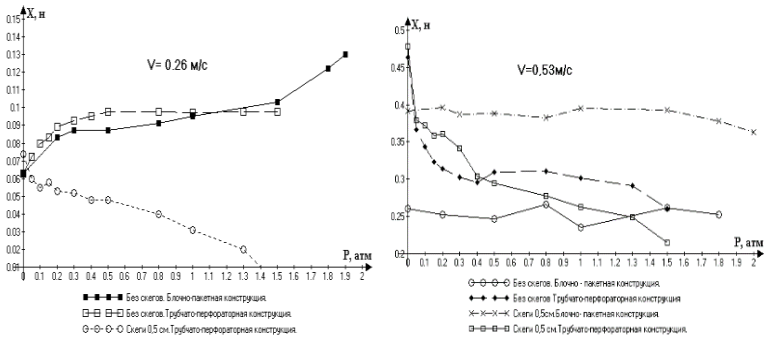


Рис. 4. Зависимость горизонтальной силы сопротивления  $X_h$  от давления воздуха и схемы его подачи

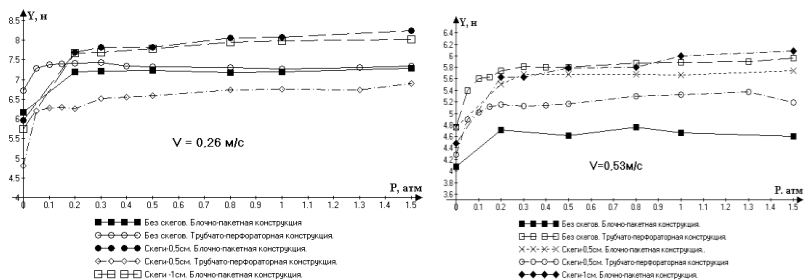


Рис. 5. Зависимость вертикальной подъемной силы  $Y_v$  от давления воздуха и схемы его подачи

На представленных графиках по оси ординат приводятся значения сил, действующих на модель, в Ньютонах:  $X$  – сила в горизонтальной плоскости – сила гидравлического сопротивления движению,  $Y$  – сила в вертикальной плоскости – подъемная сила. По оси абсцисс указаны значения давления подачи воздуха  $P$ , атм.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Установлен положительный эффект от создания воздушной каверны в днищевой части 3D-модели корпуса МБТ. Снижение силы сопротивления достигало 57 %, а увеличение подъемной силы – 36 %. Полученный положительный эффект зависит от способа подачи воздуха и конструкции днища судна, а именно:

- конструкции днищевой части корпуса: со скегами и без скегов;
- конструкции распределения воздуха: трубчатого или пакетного;
- направления подачи воздуха по отношению к набегающему потоку;
- скорости набегающего потока;
- давления воздуха, подаваемого в днищевую часть судна.

2. Наибольший эффект на 3D-модели корпуса проявляется для конструкции со скегами высотой 0,5 см и трубчатой подачей воздуха при скорости  $V = 0,53 \text{ м/с}$ . С увеличением высоты скег этот эффект пропадает из-за увеличения сопротивления на смоченной поверхности скегов.

3. По способу распределения воздуха в днищевой части следует отдать предпочтение трубчатой конструкции, т.к. в этом случае подача воздуха осуществляется в двух направлениях: в сторону днища и по направлению потока, а в блочно–пакетной схеме направление подачи воздуха только одно – перпендикулярно набегающему потоку, что создает добавочное гидравлическое сопротивление.

4. Увеличение подъемной силы проявляется при различных конструкциях корпуса и разных скоростях потока. Наибольший эффект от действия

подъемной силы наблюдается при малых скоростях и скеговой конструкции, при этом способ подачи воздуха существенно не влиял на величину подъемной силы.

5. Оптимальное давление подачи воздуха в днищевую часть 3D-модели судна составило  $P = 0,02\text{--}0,04$  МПа. Дальнейшее увеличение давления не влияло на рост подъемной силы, а лишь приводило к росту силы гидравлического сопротивления движению.

УДК 620.4539.37

### **Компьютерное моделирование в DEFORM-3D процесса скоростного выдавливания биметаллических резцов для дорожных машин**

Качанов И. В., Шаталов И. М., Ленкевич С. А., Быков К. Ю., Рабченя В. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены результаты моделирования дорожных резцов в DEFORM-3D и результаты их испытаний в лабораторных (на кафедре «ГЭСВТГ» БНТУ) и натурных (на дорогах г. Минска и Минского района РБ) условиях. На основании полученных результатов сделан вывод о принципиальной возможности производства отечественных дорожных резцов в рамках импортозамещения.*

Современное развитие промышленного производства тесно связано с использованием наукоемких и высоких технологий, обеспечивающих конкурентоспособность выпускаемой продукции на мировом рынке путем внедрения новых эффективных процессов обработки материалов при одновременном снижении энерго- и ресурсопотребления. В этой связи большими потенциальными возможностями обладают технологии, основанные на получении биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки методом скоростного горячего выдавливания (СГВ), позволяющие за один удар получать высокоточные изделия с экономией штамповых сталей до 90 % [1, 2]. Эти технологии могут получить широкое применение для получения отечественных биметаллических резцов для снятия асфальтобетонных покрытий.

Профилирование старого асфальтобетонного покрытия – это автоматически управляемый процесс его холодного фрезерования для восстановления заданного поперечного и продольного профиля, удаления бугров, выбоин, зон износа, а также других дефектов покрытия, что и выполняют современные дорожные фрезы (рис. 1).

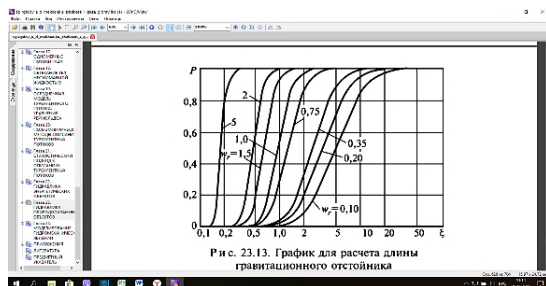


Рис. 1. Современная дорожная фреза фирмы Wirtgen для снятия асфальтобетонного полотна

Чтобы разработать технологический процесс изготовления биметаллического инструмента методом СГВ, необходимы информация о характере пластического течения, а также сведения об откликах системы «штамп – инструмент – деформируемый образец» на изменение технологических параметров. Для получения такой информации могут быть использованы методы экспериментального исследования и теоретического моделирования, а также их комбинации. Главная трудность применения всех методов экспериментального исследования заключается в необходимости изготовления технологической оснастки, стоимость которой весьма значительна.

Существенным недостатком теоретических методов является трудность или невозможность их применения к исследованию сложных процессов СГВ. Кроме того, к недостаткам следует отнести некорректность принимаемых допущений: усреднение интенсивности напряжений по очагу пластической деформации, затрудненность или невозможность учета реальных контактных условий и формоизменения деформируемого образца на каждом этапе протекания процесса, отсутствие учета волновых эффектов при ударном воздействии инструмента на деформируемую заготовку.

Альтернативой экспериментальному и теоретическому методам исследований является использование имитационного моделирования процессов объемной штамповки с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Неспоримое и весьма ценное достоинство этого метода – возможность проведения комплексного физико-механического анализа, который базируется на основных концептуальных положениях, законах и теоремах механики сплошной среды вообще и деформируемого твердого тела в частности. Корректная модель в МКЭ максимально приближена к реальному физическому процессу и позволяет учитывать весьма тонкие физические эффекты [3, 4].

Целью исследований являлось создание компьютерной модели процесса скоростного горячего выдавливания для интенсификации процесса

разработки технологии изготовления биметаллических резцов для дорожных машин и сопоставление полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований. Для проведения исследований и отработки технологии в качестве прототипа был выбран резец фирмы Wirtgen W6/20. Используя его размеры, был разработан эскиз опытного биметаллического резца, на основе которого была создана модель для анализа пластического течения в среде программы DEFORM-3D.

При компьютерном моделировании в DEFORM-3D для оптимизации экспериментальных исследований пластического течения биметаллических заготовок существует возможность создания «обратной» модели. Задавая в модели деформированного образца требуемую линию раздела двух металлов и «обратным» моделированием придавая составному образцу форму до деформации, можно установить оптимальную форму сопряжения двух частей исходной заготовки [5].

Сравнительный анализ пластического течения реальных и модельных образцов, полученного в результате компьютерного моделирования, лабораторных и натурных исследований, показал качественную и достоверную картину пластического течения в процессе скоростного горячего выдавливания. Моделирование в DEFORM-3D позволяет исключить сложные расчеты и значительно сократить число экспериментальных исследований при разработке новых технологических процессов. Возможность «обратного» моделирования позволяет до проведения экспериментальных исследований установить оптимальную форму изготовления составной биметаллической заготовки, что представляет собой вклад в теорию математического планирования эксперимента в части установления минимального количества экспериментов с прогнозируемым расположением поверхности соединяемых разнородных материалов в процессе изготовления биметаллических деталей различного функционального назначения.

На рис. 2 представлены фото образцов биметаллических резцов для дорожных машин, полученных методом СГВ, до и после натурных испытаний на автодорогах Республики Беларусь.



Рис. 2. Фото образцов биметаллических резцов для дорожных машин до испытания и после испытания на автодорогах РБ

Проведенные компьютерные, лабораторные и натурные исследования дорожных резцов позволили сделать вывод о принципиальной возможности производства отечественных дорожных резцов в рамках импортозамещения.

### **Литература**

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Минск: Технопринт, 2012. – 327 с.
2. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – 198 с.
3. Исследование технологических возможностей поперечного выдавливания методом конечных элементов / К. М. Иванов [и др.] // Металлообработка. – № 2, 2001. – С. 24–27.
4. Иванов. К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: учеб, пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб: Ин-т машиностроения, 2000. – 217 с.
5. Качанов, И. В. Моделирование процесса скоростного выдавливания биметаллических резцов для дорожных машин в среде программы DEFORM-3D / И. В. Качанов, А. А. Рубчяня, И. М. Шаталов. – Наука и техника. Международное научно-техническое издание. Серия 1. Машиностроение. – 2018. – Т. 1. – № 3. – С. 198–204.

УДК 628.112

### **Прогноз изменения характеристик водозабора подземных вод на основе его обследования**

Крицкая В. И., Ивашечкин В. В., Кондратович А. Н.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В этой работе рассмотрена усовершенствованная методика обследования отдельных элементов и сооружений водозабора подземных вод, которая позволяет оценить их текущее техническое состояние и сделать прогнозный расчет изменения производительности скважин на следующий период эксплуатации на основе решения уравнений динамического равновесия водозабора.*

Натурное обследование водозаборов подземных вод проводится для уточнения и получения фактических параметров оборудования и сооружений водозабора, оптимизации режимов его работы с анализом их

дальнейшего изменения во времени с целью планирования ремонтно-восстановительных работ.

Для оценки текущего технического состояния отдельных элементов и сооружений водозабора подземных вод [1-2], прогноза изменения этого состояния во времени и расчета изменения производительности скважин водозабора на следующий период эксплуатации на основе решения уравнений динамического равновесия необходимо совершенствование методики их обследования.

*Анализ фактического состояния скважин, остаточный срок службы*

При эксплуатации водозаборной скважины с постоянным дебитом наблюдается снижение динамического уровня и удельного дебита, и как следствие, возрастание напора насоса. Для мониторинга уровней воды в скважинах на групповых водозаборах наряду с электроуровнемерами применяют пневмоуровнемеры, особенно там, где зазоры между фланцами (муфтами) водоподъемных труб недостаточны для спуска электрода электроуровнемера. Поэтому для мониторинга предварительно в скважине должна быть смонтирована трубка из пластика диаметром 6-8 мм, открытая с двух сторон. Нижний конец трубки должен быть жестко закреплен на водоподъемной трубе выше насоса, а верхний конец – выведен на оголовок скважины. При замере уровня воды в скважине к верхнему концу подключают ручной насос с манометром и подают в трубку воздух, наблюдая за положением стрелки манометра.

Снижение удельного дебита скважины подчиняется экспоненциальной зависимости

$$q_t = q_{\text{обсл}} e^{-\beta t}, \quad (1)$$

где  $q_t$  – текущий удельный дебит, м<sup>3</sup>/с;  $q_{\text{обсл}}$  – удельный дебит скважины на момент обследования, м<sup>3</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий изменения удельного дебита скважины в связи с кольматажем (коэффициент старения скважины);  $t$  – время, с.

Выполнив анализ многолетних наблюдений за темпами снижения удельных дебитов скважин, аппроксимируют их экспоненциальной зависимостью и определяют значение коэффициента старения  $\beta$ .

Остаточный срок службы скважин  $T_{\text{ост}}$  определяют как время их работы от текущего момента времени до момента достижения минимально-допустимого удельного дебита  $q_{\text{min}} = q_{T_{\text{ост}}}$ , при котором работа скважин становится неэффективной по затратам электроэнергии. В расчете использовалась формула (1) при допущении о том, что коэффициент  $\beta$  сохраняет с течением времени свое значение. Тогда формула (1) имеет вид

$$q_{\text{min}} = \frac{q_t}{e^{\beta T_{\text{ост}}}}, \quad (2)$$



Отсюда остаточный срок службы скважин составит

$$T_{\text{ост}} = \frac{\ln \frac{q_r}{q_{\text{min}}}}{\beta}. \quad (3)$$

*Методика анализа технического состояния насосного оборудования*

Фактическую напорную характеристику насоса  $H=f(Q)$  с достаточной степенью точности можно построить непосредственно на скважине, чтобы оценить степень износа насоса.

Пусть насосная установка в достаточной степени укомплектована запорно-регулирующей арматурой (обратный клапан, задвижка) и контрольно-измерительной аппаратурой (манометры, датчики давления, водомер).

Выражение для расчета напора  $H''$  погружного насоса при снятии характеристики  $H''=f(Q)$  на его рабочем месте имеет вид

$$H'' = H_{\text{дин}} + h' + \sum h_{\text{тр1-2}} + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{дин}}$  – динамический уровень;  $h'$  – расстояние от оголовка скважины до оси внутрискважинного трубопровода;  $\sum h_{\text{тр1-2}}$  – потери напора на участке 1-2;  $p_{2\text{ман}}$  – показание манометра;  $v_{\text{вст}}$  – скорость во внутрискважинном трубопроводе;  $v_{\text{вп}}$  – скорость в водоподъемной трубе.

Для построения напорной характеристики насоса ступенчато изменяют его подачу и фиксируют показания манометра, снимают показания водомера и пневмоуровнемера. Напор насоса вычисляют по формуле (4).

Данные замеров заносят в таблицу, строят график зависимости  $H''=f(Q)$ .

Для оценки степени снижения напорной характеристики насоса в результате износа, в той же координатной сетке наносят паспортную характеристику насоса  $H_0^H = f(Q)$ , снятую на заводе изготовителе, если на скважине был установлен новый насос.

Аппроксимируем полиномиальной зависимостью характеристику насоса (нового или после ремонта) в момент установки на скважину

$$H_0^H = c - aQ^2 - bQ, \quad (5)$$

где  $c$  – некоторый фиктивный напор насоса;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты кривой, характеризующие его фиктивное гидравлическое сопротивление.

Тогда выражение для характеристики насоса  $H''_{\text{обсл}}$  на момент обследования, можно представить в виде

$$H''_{\text{обсл}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}}}{c}\right) \cdot c - aQ^2 - bQ. \quad (6)$$

Если на скважине имеется ряд наблюдений в разные моменты времени за снижением напорной характеристики насоса, можно получить эмпирическую зависимость  $\Delta H=f(t)$  вида

$$\Delta H_t = \Delta H_{\text{обсл}} \cdot e^{\psi t}, \quad (7)$$

где  $\psi$  – коэффициент интенсивности снижения напора насоса на данной скважине, зависящий от марки насоса.

Это дает возможность делать прогноз изменения напорной характеристики насоса через заданный промежуток времени  $t$ , отсчитываемый от момента обследования. Тогда с учетом (6) и (7) получим

$$H_t^H = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}} e^{\psi t}}{c}\right) \cdot c - aQ^2 - bQ. \quad (8)$$

#### *Прогнозный расчет производительности водозабора*

Расходы скважин на расчетный срок  $t$ , исчисляемый от момента обследования водозабора, находят на основе решения системы уравнений динамического равновесия водозабора [3]. Число уравнений системы равно количеству скважин  $N$  линейного водозабора.

$$\left. \begin{array}{l} H_1^H - H_1^c \text{ потр} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ H_n^H - H_n^c \text{ потр} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ H_N^H - H_N^c \text{ потр} = 0 \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Уравнение для  $n$ -ой скважины водозабора имеет вид [4]

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_{\text{обсл.}n}} \left( e^{\beta \cdot t} + \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right) + \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2} + H_{\text{ст.}n} + Z_n + \Delta H_{nt} - \left( 1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}} e^{-\psi \cdot t}}{c_n} \right) c_n = 0, \quad (10)$$

где  $\Delta H_m$  – суммарные потери напора в колонне водоподъемных труб, ввнутристанционном трубопроводе, линии подключения к сборному водоводу и на участках сборного водовода от точки подключения до резервуара чистой воды (станция обезжелезивания) через время  $t$ .

Система уравнений (10) решается на ЭВМ и позволяет получить динамику изменения дебитов скважин в процессе эксплуатации.

## Литература

1. Волоховский, Г. А. Эксплуатация и ремонт систем сельскохозяйственного водоснабжения: Справочник / Г. А. Волоховский. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 224 с.
2. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
3. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учебное пособие / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. – Минск: «Высшая школа», 1989. – 269 с.
4. Ивашечкин, В. В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин: монография / В. В. Ивашечкин; под ред. А. Д. Гуриновича. – Минск.: БНТУ, 2005. – 270 с.

УДК332.36

### Размеры санитарно-защитной зоны ветроэнергетических установок

Коревицкий Г. А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением границ санитарно-защитных зон (далее – СЗЗ) ветроэнергетических установок (далее – ВЭУ). Проанализированы факторы, определяющие их размеры. Подробно рассмотрена методика определения дальности отлета различных предметов (льда, элементов лопастей и проч.), сорвавшихся с лопасти ветроэнергетических установок во время их работы.*

В соответствии с санитарными нормами и правилами «Требования к организации санитарно-защитных зон предприятий, сооружений и иных объектов, являющихся объектами воздействия на здоровье человека и окружающую среду», утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 35 от 15.05.2014, базовый размер СЗЗ для ветроэнергетических установок не установлен и определяется расчетом.

К физическим факторам загрязнения, определяющим размеры СЗЗ ВЭУ, относятся вибрация, инфразвуковые колебания, ультразвуковое воздействие, электромагнитные поля, ионизирующее излучение радиоактивных веществ, шум, отрыв и падение лопастей и льда. Вышеперечисленные факторы, за исключением последнего, определяются расчетом по методикам, приводимым в действующих нормативах. Методики, позволяющей определять дальность разлета предметов, сорвавшихся с ветроколеса ВЭУ, не приводится ни в нормативной, ни в справочной литературе.

В процессе эксплуатации ВЭУ при определенных условиях может возникнуть явление обледенения лопастей. Образование наледи на лопастях опасно для окружающих: в какой-то момент этот лед, срывается и отлетает на значительное расстояние.

В этой связи возникает необходимость разработки методики, позволяющей определить дальность отлета различных предметов (льда, элементов лопастей), сорвавшихся с лопасти ветроколеса ВЭУ при его вращении.

Задаемся системой координат (рис. 1): абсолютная система координат  $Oxyz$  неподвижна и ее начало размещается в основании башни; относительная система координат  $Ox_1y_1z_1$  подвижна и располагается на кромке лопасти ветроколеса в месте предполагаемого отрыва от лопасти осколка льда. Оси подвижной и неподвижной систем координат параллельны и совпадают по направлению.

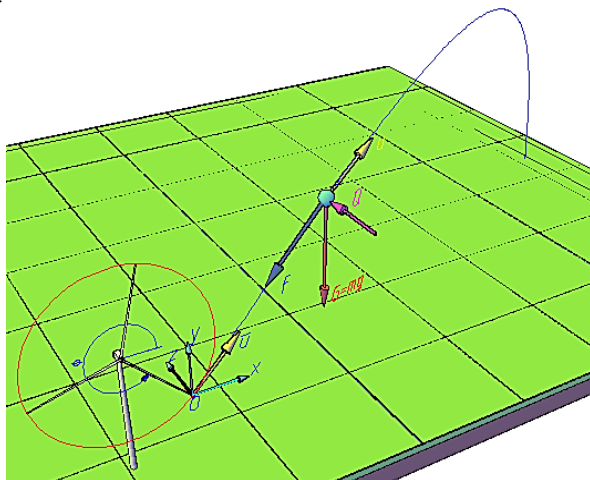


Рис. 1. Расчетная схема

Линейная или окружная скорость  $\vec{v}$  направлена по касательной к траектории движения точки. При равномерном вращении лопастей ветроколеса окружная скорость  $\vec{v}$  может быть определена по выражению

$$\vec{v} = \frac{2\pi Rn}{60},$$

где  $R$  – радиус ветроколеса;  $n$  – частота вращения лопастей ветроколеса.

На материальную точку во время полета действует три силы:

- сила тяжести  $G$ ;
- сила сопротивления воздуха  $F$ ;

– сила ветра  $Q$ , действующая на летящее тело.

Дифференциальные уравнения движения центра массы тела в выбранной системе координат имеют следующий вид:

$$\begin{cases} m \frac{d\vartheta_x}{dt} = -F \cos(\widehat{F\vartheta_x}); \\ m \frac{d\vartheta_y}{dt} = -G - F \cos(\widehat{F\vartheta_y}); \\ m \frac{d\vartheta_z}{dt} = Q - F \cos(\widehat{F\vartheta_z}). \end{cases}$$

В этой системе сила тяжести

$$G = mg$$

Сила сопротивления воздуха, действующая на летящее тело:

$$F = C_{x0} \frac{\rho \vartheta^2}{2} S = k\vartheta^2,$$

где  $C_{x0}$  – безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления;  $S$  – характерная площадь тела;  $\rho$  – плотность среды (воздуха);  $\vartheta$  – скорость тела относительно неподвижной системы координат.

Сила ветра, действующая на летящее тело:

$$Q = C_{x0} \frac{\rho \vartheta_w^2}{2} S = k\vartheta_w^2,$$

где  $\vartheta_w$  – скорость ветра относительно неподвижной системы координат.

Скорость тела

$$\vartheta = \sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 + \vartheta_z^2}.$$

Начальные условия, в момент времени  $t = 0$  (в момент отрыва тела от лопасти) будут:

$$t = 0 \begin{cases} x_0 = R \cos \varphi; \\ y_0 = H + R \sin \varphi; \\ z_0 = 0; \\ \vartheta_{x_0} = \vartheta \cos \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right); \\ \vartheta_{y_0} = \vartheta \sin \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right); \\ \vartheta_{z_0} = 0; \\ 0 \leq \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

где  $R$  – радиус ветроколеса;  $\varphi$  – угол между радиусом вектором окружности лопастей ветряка и положительно направленной горизонтальной осью  $Ox$ ;  $H$  – высота башни ветряка (расстояние от основания башни до оси вращения ветроколеса).

Разделив правые и левые части уравнений на массу  $m$ , получим:

$$\begin{cases} \frac{d\vartheta_x}{dt} = -\frac{k}{m}\vartheta_x\sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 + \vartheta_z^2}; \\ \frac{d\vartheta_y}{dt} = -g - \frac{k}{m}\vartheta_y\sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 + \vartheta_z^2}; \\ \frac{d\vartheta_z}{dt} = \frac{k}{m}\vartheta_z^2 - \frac{k}{m}\vartheta_z\sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 + \vartheta_z^2}. \end{cases}$$

Полученная система дифференциальных уравнений позволит определить положение материальной точки в любой момент времени. Эта система не может быть проинтегрирована, возможно лишь приближенное решение ее численными методами.

Приведенная методика использовалась для определения размеров СЗЗ в районе а.г. Невда Новогрудского района Гродненской области. Объект введен в эксплуатацию в 2018 году и в настоящее время успешно эксплуатируется. ВЭУ фирмы «Vestas», Дания, мощность 2,0 МВт, высота 80 м, диаметр ветроколеса 110 м, частота вращения ветроколеса 14,89 об/мин, допустимая скорость ветра 22 м/с. Для решения использовался численный метод решения системы ОДУ Рунге-Кутты 4-го ранга в приложении Microsoft Excel. Вычисления выполнялись с постоянным шагом времени  $\Delta t = 0,01$  с для различных размеров осколков льда. Результаты расчетов показали, что осколки льда могут отлететь на расстояние более 400 м (рис. 2).

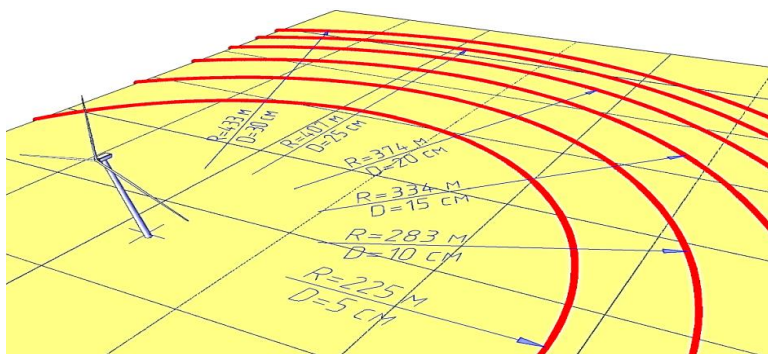


Рис. 2. Радиусы разлета осколков льда разных размеров

Предлагаемая методика позволяет определять размеры СЗЗ, либо, при необходимости, вводить определенные ограничения в работу ВЭУ (например, ограничение разворота гондолы ВЭУ или остановка ВЭУ при обледенении лопастей ветроколеса).

**Защита акватории морских портов оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля**

Синица Р. В., Осадчий В. С., Анисимов К. И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*В статье представлены результаты проведенных экспериментов на физических моделях конструкций оградительных гидротехнических сооружений неполного вертикального профиля с целью определения параметров гашения волн при переливе через верхнее строение на защищаемую акваторию. Представлен метод определения расчетной величины гашения волн.*

Защита акваторий портов, а также элементов береговой инфраструктуры морских городов, обеспечивается оградительными гидротехническими сооружениями (ОГТС), значительно уменьшающими волновое воздействие, тем самым повышающими безопасность причальных сооружений, морских судов и грузов.

В инженерной практике строительства оградительных и берегозащитных сооружений применяются сооружения неполного вертикального профиля, через гребень которых допускается частичный перелив волн с дальнейшим изменением их основных волновых параметров. Однако в нормативных документах многих стран по проектированию оградительных гидротехнических сооружений (ОГТС) [1] отсутствуют практические рекомендации, позволяющие определять величину гашения волн сооружениями такого типа.

В практике допустимые высоты волн на защищаемых акваториях морских портов регламентируются водоизмещением расчетного судна и способом его постановки к фронту волны исходя из возможности осуществления швартовых операций и обеспечения в момент контакта судна с отбойными устройствами причальных сооружений нормальных составляющих их скорости подхода. Допустимые высоты волн, ожидаемые на защищаемых участках городской инфраструктуры, регламентируются параметрами сохранения морских берегов и пляжного материала, недопущением затопления прибрежных территорий вследствие воздействия штормов редкой повторяемости.

Сотрудниками кафедры Гидротехнического строительства Одесской государственной академии строительства и архитектуры (ОГАСА) была выполнена научно-исследовательская работа [2] для обоснования строительства ОГТС неполного вертикального профиля с целью защиты прилегающей к акватории территории завода сельскохозяйственного машиностроения от воздействия штормовых волн. Проработано проектное решение по возведению

комплекса ОГТС, которые смогли бы препятствовать воздействию экстремальных волн на существующее берегозащитное сооружение.

В проекте рассматривалось создание ОГТС неполного вертикального профиля (рис. 1), расположенного на расстоянии 200 м от береговой линии на глубине  $d = 4,0$  м. Вследствие ветрового нагона 1 %-ой обеспеченности глубина воды у сооружения может достигать  $d = 5,0$  м. По построенным лучам рефракции и трансформации волн от воздействия ветров южных и юго-восточных направлений были определены значения высот волн расчетной обеспеченности в месте расположения проектируемого сооружения. Высота волны на глубине  $d = 4,0$  м составит  $h = 2,4$  м с длиной, равной  $\lambda = 24,5$  м. При волновом нагоне 1 %-ой обеспеченности высота волны составит  $h = 2,55$  м, а длина волны  $\lambda = 30,0$  м. Проведенными расчетами было установлено, что максимальная высоты волны 1 %-ой обеспеченности на защищаемой акватории не должна превышать  $h = 1,5$  м во избежание затопления территории завода.

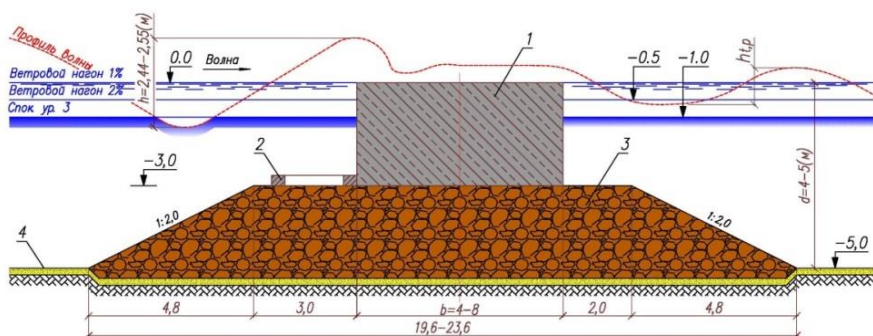


Рис. 1. Поперечный разрез конструкции ОГТС неполного вертикального профиля:

- 1 – бетонный массив, 2 – берменный массив (щелевая плита),  
3 – каменная постель

Экспериментальные исследования были проведены в гидроволновой лаборатории кафедры Гидротехнического строительства ОГАСА на физических моделях конструкций ОГТС неполного вертикального профиля в геометрическом масштабе 1:15 (рис. 2).



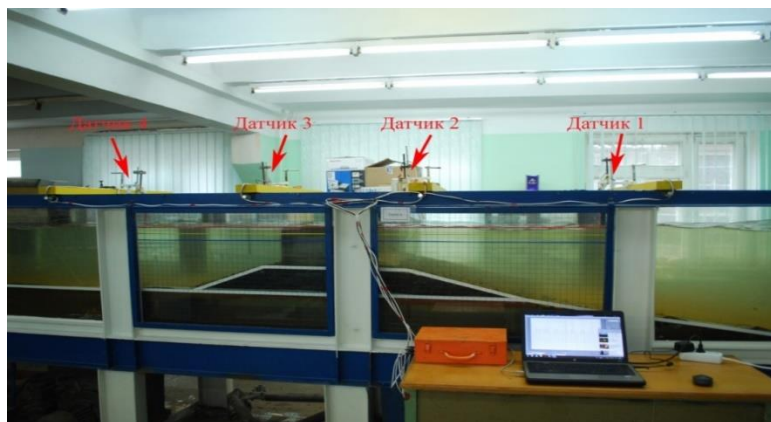


Рис. 2. Модель оградительного сооружения неполного вертикального профиля в волновом лотке

Задача исследований заключалась в определении параметров волн в четырех участках экспериментального лотка: перед сооружением неполного вертикального профиля на расстоянии двух длин волн от щитового волнопродуктора (датчик 1), над каменной постелью ОГТС непосредственно перед бетонным массивом (датчик 2), за ОГТС (датчик 3) и на защищаемой акватории (датчик 4).

Запись волнограмм в процессе волногашения велась с помощью четырех датчиков, что позволяло производить наблюдение одного процесса в четырех различных местах гидроволнового лотка одновременно. Подробное описание и устройство применяемой измерительной аппаратуры дано в статье [4]. Датчики были подключены к АЦП Е-14-140М (1Т189948) и в дальнейшем к компьютеру, в котором при помощи программы LGraph 2 (версия 2.34.60) аналоговый сигнал преобразовывался в цифровой.

Влияние сил трения, капиллярности и упругости при образовании поверхностных гравитационных волн незначительно, поэтому в эксперименте не учитывалось. Это позволило при моделировании взаимодействия гравитационных волн с оградительным сооружением производить пересчет полученных опытных результатов в натуру в соответствии с законами механического подобия и, в частности, законом гравитационного подобия Фруда [3].

Для определения величины гашения волн бетонным массивом ОГТС неполного вертикального профиля при переливе волн через гребень были установлены факторы его влияния [5], а также уровни их варьирования, представленные в таблице.

Факторы и уровни их варьирования опытов

	Исследуемые факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
$X_1$	Высота волны $h_i$ , м	0,6	1,8	3,0	1,2
$X_2$	Возвышение гребня сооружения $\Delta H$ , м	0	0,5	1,0	0,5
$X_3$	Ширина гребня $B$ , м	4,0	6,0	8,0	2,0

Под влиянием исследуемых факторов рассчитана многофакторная модель изменения параметров гашения волн с использованием типовой версии программы «СТАТИСТИКА».

В результате реализации эксперимента было получено уравнение регрессии для определения высоты волны на защищенной акватории:

$$h_r = 0,717 + 0,510 \cdot X_1 - 0,235 \cdot X_2 - 0,140 \cdot X_3 - 0,180 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,110 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (1)$$

После замены значений  $X_1, X_2, X_3$  и проведения математического упрощения формула (1) может быть представлена в виде

$$h_r = 3 \cdot h_i \cdot h_b + 0,07 \cdot \Delta H + 0,013 \cdot b - 0,165 \quad (2)$$

где  $h_i$  – исходная высота волны, м;  $\Delta H$  – возвышение верхнего строения оградительного сооружения над спокойным уровнем моря, м;  $b$  – ширина верхнего строения оградительного сооружения, м;  $h_b$  – вспомогательный коэффициент, определяемый в соответствии с формулой (3).

$$h_b = (0,3 - 0,1 \cdot \Delta H - 0,01 \cdot b) \quad (3)$$

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение конструкций ОГТС неполного вертикального профиля для защиты акваторий морских портов и элементов городской инфраструктуры является перспективным и инвестиционно привлекательным;
- занижение отметки верхнего строения оградительных сооружений позволит снизить финансовые затраты при строительстве новых конструкций оградительных сооружений;
- перелив гребней волн через верхнее строение оградительных сооружений не приведет к аварийным ситуациям на защищаемых акваториях;
- полученная эмпирическая зависимость может быть применима в инженерной практике при определении величины гашения волн ОГТС неполного вертикального профиля.

### Литература

1. Строительные нормы и правила СНиП 2.06.04 – 82\* Нагрузки и

воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): введен 1 января 1986 г. / Госстрой СССР–М: 1986. – 85 с. – (офиц. текст).

2. Научно-исследовательская работа «Расчетное обоснование и проектирование конструкций гидротехнических сооружений для защиты от затопления морскими волнами территории завода по адресу: г. Одесса, ул. Черноморского Казачества, 72.», ОГАСА, Одесса: 2016. – 138 с.

3. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М: «Наука», 1977. – С. 113-162.

4. Столяров, Л. С. Определение параметров волн в лабораторных условиях при помощи современной измерительной аппаратуры /Л. С. Столяров, А. В. Чернецкий, Р. В. Сеница. Вестник ОГАСА, вып. 73. – Одесса, 2018. – С. 127–134.

5. Любченко, Е. А. Планирование и организация эксперимента. Часть 1 / Е. А. Любченко, О. А. Чуднова. – Владивосток: изд-во ТГЭУ, 2010. – 148 с.

УДК 626/627

#### **Учет пространственного эффекта при статических расчетах устойчивости грунтовых откосов**

Великий Д. И., Слободянюк В. П., Осадчий В. С., Дмитриев С. В.  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*Проблемы устойчивости грунтовых откосов и развитие оползневых процессов, в том числе Черноморского побережья, представляют существенную опасность для населения и существующих зданий и сооружений. При расчетах устойчивости склонов отмечается различие в расчетных значениях коэффициентов устойчивости в двух- и трехмерной постановках задач. Анализ проведенных исследований указывает на необходимость учета влияния топографических условий всего склона при его расчете по плоским схемам в пределах назначенных створов.*

Задача обеспечения устойчивости грунтовых массивов возникает при проектировании сооружений гидротехнического, промышленного, гражданского, транспортного и других назначений. В качестве грунтовых массивов рассматриваются откосы насыпей и выемок, естественные склоны при их хозяйственном использовании. Вследствие освоения территорий, которые раньше считались опасными и не предназначенными под строительство, все чаще приходится возводить здания и сооружения на грунтовых откосах и неустойчивых склонах.

Впервые способ расчета устойчивости склонов, основанный на принципе Кулона, был предложен в 1820 г. Спустя почти два века оценка устойчивости склонов по-прежнему остается сложной задачей в геотехнике [1]. В настоящее время существует более 100 методов расчетов устойчивости грунтовых откосов. Выбор метода расчета в первую очередь определяется типом оползневого процесса и механизмом возможного смещения оползневых масс. Наиболее известными методами расчетов устойчивости склонов в плоской постановке задачи являются метод круглоцилиндрической поверхности скольжения, метод Р.Р. Чугаева, метод горизонтальных сил, Г.М. Шахунянца, Янбу, Бишопа, Моргенштерна-Прайса и т.п.

Важным и активно развивающимся направлением в расчетах устойчивости склонов является трехмерный анализ. В настоящее время трехмерное моделирование прочно вошло в практику инженерных расчетов. К настоящему моменту разработано большое количество методов трехмерных расчетов, например, методы Анагности, Ховланда, Чена. Многие производители специализированного программного обеспечения SoilVisionSystems (Канада), MIDAS GTS NX (Южная Корея), TAGAsoft (США), Rocscience (Канада), PLAXIS (Ирландия) и т. д. уже имеют программные модули по трехмерному моделированию, в которых реализованы методы расчетов устойчивости на основе концепции как предельного равновесия, так и с использованием метода конечных элементов.

По оценке результатов работ зарубежных авторов, при постоянстве физико-механических характеристик грунтов влияние на значение коэффициента устойчивости оказывает форма и геометрия самого склона. Так, к примеру, в работах С.Zhang (Жанга) было отмечено, что в зависимости от формы склона (от выпуклой до вогнутой) значение коэффициента устойчивости изменится почти на 20 % [2].

Также при расчетах устойчивости искусственных грунтовых откосов и природных склонов сложной формы в плане инженерными методами в двухмерной постановке задачи важным фактором, от которого зависит корректность получаемых результатов, является выбор места проведения поперечного разреза, по которому выполняется расчет [3]. В ходе выполнения расчетов устойчивости склона на территории Греческого (Лунного) парка в г. Одессе было отмечено несоответствие полученных результатов с реальной обстановкой рассматриваемого склона. Расчетные значения коэффициентов запаса устойчивости (двухмерная задача) по трем поперечным разрезам не превышали 0,8, а визуальное и инструментальное обследование данного склона показали отсутствие признаков его подвижек. Принимая во внимание работу Руохолла [4], было принято решение об определении коэффициента устойчивости, который мог бы реально оценить устойчивости склона на этом участке и определить возможные границы оползневого тела. В рассматриваемом

мом случае учитывалась пространственная работа склона, где реализуется учет влияния расчетных створов друг с другом и соседних участков склона. В результате расчета было получено значение коэффициента запаса устойчивости, которое составило 1,064, что в большей степени соответствует реальной обстановке по сравнению с результатами, полученными по двумерным схемам.

При дальнейших исследованиях было отмечено, что на величину коэффициента устойчивости влияет протяженность склона. Так, к примеру, в работах Yasoub [5] показано, что при увеличении длины расчетного склона изменяется значение коэффициента запаса устойчивости.

Для разработки методики расчета устойчивости грунтовых откосов по двумерным схемам инженерными методами с учетом их топографических особенностей (рис. 1) было принято решение о выявлении переменного коэффициента, который мог бы позволить учитывать пространственную работу сооружения в зависимости от его геометрических характеристик. Для этого были построены графики (рис. 2), которые дают возможность определить величину поправочного коэффициента  $K_{л}$ , который можно использовать для уточнения величины устойчивости, полученной в результате расчетов однородных грунтовых насыпей и естественных склонов в двумерной постановке задачи.

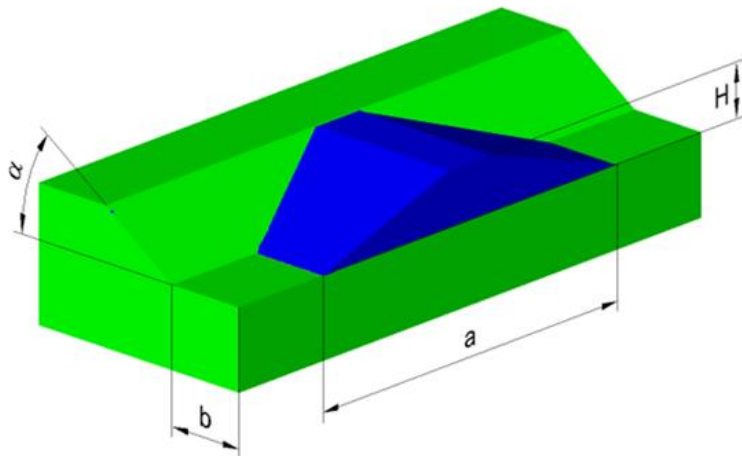


Рис. 1. Параметры исходных данных:

$\alpha$  – угол залегания примыкающих откосов к насыпи,  $a$  – ширина сооружения в основании,  $b$  – протяженность насыпи

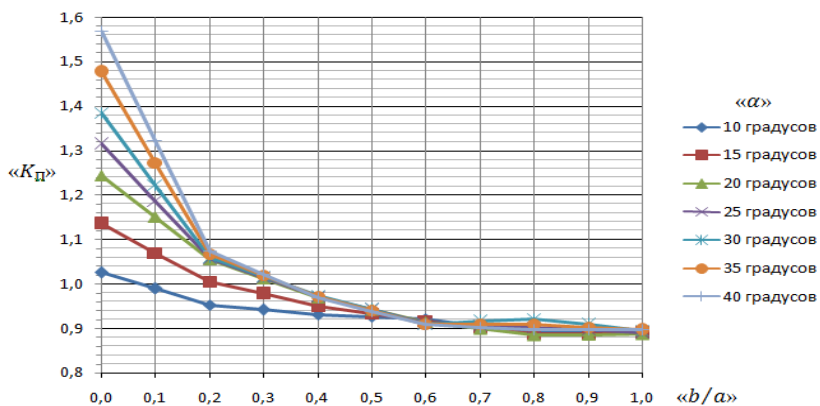


Рис. 2. График определения поправочного коэффициента для однородной грунтовой насыпи высотой  $H = 8,0$  м

На графиках (рис. 2) по горизонтальной оси откладывается значение отношения протяженности насыпи  $b$  к ширине сооружения в основании  $a$ , по оси ординат – значение поправочного коэффициента  $K_{п}$ .

Таким образом, при определении коэффициента запаса устойчивости, полученного для двухмерной задачи, необходимо его уточнять в зависимости от геометрических характеристик расчетного сооружения (высота, угол наклона примыкающих откосов к насыпи в продольном направлении, отношения протяженности насыпи к ширине сооружения в основании) путем умножения на поправочный коэффициент  $K_{п}$ , полученный в данной работе опытным путем.

Разработанная и предложенная в работе методика расчета устойчивости грунтовых откосов по плоским схемам с учетом пространственного эффекта может быть применима при проектировании протяженных грунтовых насыпей для автомобильных дорог, железнодорожных путей, при проектировании грунтовых плотин, дамб обвалования, при расчетах устойчивости грунтовых склонов как искусственного, так и природного сложения.

Предлагаемый метод расчета устойчивости грунтового откоса по двухмерным схемам с применением выведенного поправочного коэффициента позволяет в полной степени оценить степень устойчивости расчетного сооружения с учетом его геометрических особенностей.

Применяя предлагаемый метод в расчетах устойчивости грунтовых откосов, можно в значительной мере уменьшить трудозатраты, необходимые для создания и расчета пространственных моделей.

## Литература

1. Кан, К. Оценка оползневой опасности территорий с высокой сейсмичностью (на примере Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай)): дис. канд. геол.–мин. наук: 25.00.08 / Кан Кай. – Москва, 2019. – 167 с.

2. Zhang, Yingbin, et al. Effects of geometries on three-dimensional slope stability // Canadian Geotechnical Journal, vol. 50, no. 3, 2013. – P. 233–239.

3. Kalatehjari, Roohollah, et al. Determination of three-dimensional shape of failure in soil slopes // Canadian Geotechnical Journal, vol. 52, no. 9, 2015. – P. 1283–1291.

4. Гаврилов, А. В. Оценка устойчивости оползневых склонов на основе трехмерного моделирования. / А. В. Гаврилов. Инженерная геология 6/2013. – С. 46–55.

5. Using Shear Strength Reduction Method for 2D and 3D Slope Stability Analysis. Thamer Yacoub, Ph.D. P. Eng. President, Rocscience Inc. Annual Kansas City Geotechnical Conference, 2016.

УДК 626.22

### **Критерии выбора технологии поддержания заданного качества воды в мелководных водоемах юга Украины**

Слободянюк В. П., Осадчий В. С., Великий Д. И., Каракчи Г. Д.  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*В работе рассмотрены проблемы дефицита пресной воды в южных регионах Украины, связанных с такими факторами, как глобальное потепление и нерациональное использование водных ресурсов. Проанализированы данные исследований за последние несколько лет по качеству воды озер Китая и Сасык. Выявлена и обоснована необходимость разработки и реализации генеральной программы освоения водоемов с пресной водой.*

Официальная информация, опубликованная Государственным агентством водных ресурсов, содержит анализ запасов пресной воды (на душу населения) в 195-ти странах мира. Украина в этом списке занимает 111-е место. Однако, невзирая на этот достаточно весомый показатель, существует риск дефицита пресной воды в ряде южных регионов страны, в частности, в Одесской, Херсонской, Николаевской, Днепропетровской и Запорожской областях. Даже сейчас, как сообщает Госагентство, в центре и на севере Одесской области часть населенных пунктов пользуется привозной питьевой водой, причем ситуация в этих регионах только ухудшается и практически нет

надежд на ее улучшение. Этот прогноз также подтверждают специалисты Института водных проблем и мелиорации, увязывая его с негативными тенденциями мирового масштаба, вызванными различными причинами, в частности глобальным потеплением [1] и нерациональным использованием водных ресурсов. Если тенденции сохранятся, то к 2050 году в Украине площадь засушливой и очень засушливой зоны возрастет на 20-30 %, а к 2100 году останется лишь часть Волынского Полесья со статусом влажного региона.

Если мы не отнесемся должным образом к проблеме воды, не начнем формировать и реализовывать политику современного, экономного, рационального водопользования, то уже в ближайшие 10-15 лет Украина ощутит на себе результаты дефицита пресной воды [2].

Все вышесказанное указывает на то, что уже сейчас необходимо начать работы по созданию значительных научно обоснованных резервных объемов воды для использования их как в настоящем, так и будущем. Изучение и анализ накопленного мирового опыта показывает, что в условиях неравномерного распределения источников пресной воды, а иногда и значительного их удаления от центров потребления, такие резервы могут быть накоплены в водохранилищах как естественных (озера и ставки), так и искусственных (плотинные гидроузлы). Однако бесперебойное функционирование воднохозяйственных комплексов на базе водохранилищ возможно только при соответствующем качестве воды, управление которым должно стать основной задачей в водной стратегии Украины. Своевременные меры, принятые сейчас, дадут возможность свести к нулю или уменьшить до безопасного уровня влияние отрицательных природных и антропогенных факторов на качество пресной воды в этих водоемах [3].

Выводы, которые следуют из всего вышесказанного, указывают на то, что подготовку к приближающемуся реальному дефициту пресной воды нужно инициировать уже сейчас, начав с разработки генеральной программы освоения водоемов с пресной водой. Условно такую программу логично разделить на три функционально однородные составные части:

1. Административная деятельность, включающая в себя правовые, экономические, инвестиционные и тому подобные аспекты.

2. Гидрологическое и экологическое направления, включающие в себя результаты всевозможных наблюдений за источником пресной воды, разработка стратегий для уменьшения всех видов потерь, особенно в преддверии глобальных природных изменений, а также определение текущих целей и формулировка рекомендаций.

3. Гидротехническое и мелиоративное, технико-экономические инструменты, включающие в себя разработку технологий для достижения целей, сформулированных в пункте 2, а также проектирование необходимых для этого гидротехнических сооружений.



Работа в административном направлении уже началась, как отмечают в Государственном агентстве водных ресурсов Украины, усилен контроль за качеством воды, сбрасываемой прямо в поверхностные водные объекты, так как именно в них ежегодно сбрасывается около 5 млрд. м<sup>3</sup> стоков, включающих неочищенные сточные воды объемом около 1 миллиарда м<sup>3</sup>. Кроме этого, Госводагенство меняет сами принципы управления водными ресурсами, а именно, реформирование системы мониторинга качества поверхностных вод и переход от административно-территориального принципа управления водными ресурсами к бассейновому аналогу. Таким образом, по всему стволу реки будут комплексно решаться все возникающие проблемы, включая борьбу с загрязнением водных объектов неочищенными сточными водами и проведение гидрологических мероприятий по оздоровлению реки и примыкающими водоемами.

В отношении второй составляющей, без которой невозможно разработать оптимальный вариант комплексного использования пресноводных источников, необходимо отметить, что имеется большое количество глубоких и детальных многофакторных наблюдений, и исследований. В частности, для озер юго-запада Украины накоплен богатый материал выполненных за длительный период и продолжающихся в настоящее время наблюдений за изменениями химических, физических, механических и биологических факторов.

Третий условный пункт можно рассматривать как инструмент, с помощью которого на административно-правовой базе условного пункта 1 и с учетом рекомендаций условного пункта 2 разрабатываются:

а) технология поддержания требуемого стандартами качества воды в закрытом водоеме;

б) проектирование инженерных гидротехнических сооружений, обеспечивающих эти требования.

Воды закрытых водоемов широко используются многими субъектами хозяйственной деятельности для различных целей (питьевое водоснабжение, орошение земель сельскохозяйственного назначения, разведение водоплавающей птицы, рыбное хозяйство, скотоводство и т.п.), причем схемы такого водопользования, особенно комплексного, не всегда экономически целесообразны.

Во второй половине прошлого столетия уже делались попытки решить задачу улучшения качества воды в некоторых естественных водохранилищах Одесской области (в частности озера Сасык и Китай) [4] с целью приспособить их для хозяйственных нужд. Однако в то время не были разработаны технические принципы решения подобных задач, не было ни мощных ЭВМ, ни программных комплексов, позволявших рассчитывать плановые течения в протяженных мелководных водоемах, в связи с чем результат оказался нулевым. Кроме этого, применявшиеся в те времена оценки

экономической эффективности и экологической безопасности не были адаптированы к условиям зарождавшегося рынка, что также оказало негативное влияние на выбор схемы водопользования.

Любая расчетная программа водопользования не является догмой и может быть откорректирована ее долевыми участниками в зависимости от меняющихся или новых условий: юридических, финансовых, технических и др. Очевидно, что наличие разработанной программы позволит избежать возможных недоразумений, а также осуществлять контроль того, что откорректированное решение будет оставаться в зоне возможной реализации и не будет убыточным.

Когда все объемы и их назначение уточнены, можно приступать к разработке технологии бесперебойного функционирования водно-хозяйственного комплекса на базе водохранилища, поддерживая соответствующее качество воды путем регулирования основными факторами, определяющими это качество. В качестве основных факторов обычно технологи рассматривают химические, физические, механические и биологические от их происхождения зависит степень их управляемости, а от природы – технологические аспекты управления.

Таким образом, получив технологические схемы, можно приступать к следующему, третьему этапу генеральной программы – проектированию гидротехнических сооружений, способных надежно и гарантированно реализовать эти схемы, целью которых будет являться достижение необходимого качества воды в водоеме в соответствии с требуемыми показателями и поддержание этого качества в период осуществления водопользователями своей хозяйственной деятельности. Только такой подход, когда соблюдаются все требования (включая эксплуатационные), предъявляемые к подобным проектам, обеспечит достижение максимальной рентабельности в период всего срока функционирования водного комплекса.

## Литература

1. Шахман, І. О. Обґрунтування стратегії водогосподарських заходів на території нижнього Подніпров'я в умовах глобального потепління. Розрахунок складових водного балансу озера Китай / Шахман І. О., Лобода Н. С. // Український гідрометеорологічний журнал. № 6, 2019. – С. 210-216.
2. <https://nv.ua/ukraine/events/defitsit-vody-cherez-10-15-let-i-pustyni-cherez-80-kakie-problemy-s-vodosnabzheniem-zhdt-ukrainu-2459126.htm>.
3. <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-formirovaniya-kachestva-vody-v-iskusstvennom-vodoeme-1>.
4. Гопченко, Е. Д. Водные ресурсы северо-западного причерноморья (в естественных и нарушенных антропогенной деятельностью) / Е. Д. Гопченко, Н. С. Лобода // Киев: КНТ, 2005. – 188 с.

## Прогноз осадок ростверков причальной галереи, расположенных на слабых грунтах, с учетом процессов консолидации

Анисимов К. И., Коломиец С. П., Великий Д. И.  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений на слабых грунтах сопровождаются длительным периодом консолидации и проявляется осадками. Для прогноза их величин предлагается использовать результаты расчета конечно-элементной модели сооружения и короткий ряд данных наблюдений.*

Основанием ростверков строящейся причальной галереи в порту Южный являются сваи, погруженные до отметки  $-21,24$  м (отметка верха сваи составляет  $+1,36$  м). После образования территории путем намыва песка в пазухи причала сваи находятся в песке на глубине  $13,56$  м, илах мощностью  $5$  м, текучепластичных глинах мощностью  $3$  м, а также в суглинке мягкопластичном на глубине около  $1$  м.

При сжатии ила и слабого глинистого грунта, перемещении вниз песчаного слоя сваи испытывают пригрузку за счет отрицательного трения. Пята сваи погружена в слой суглинки с показателем текучести  $0,61$  (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная схема сваи

Несущая способность грунта в этом слое составляет  $37,5$  т, в то время как величина отрицательного трения составляет  $63,1$  т. Это означает, что сваи

должны перемещаться вниз вместе с оседающим слоем песка до стабилизации консолидационных процессов в слоях ила и суглинка. После стабилизации осадок расчетная нагрузка на сваю будет составлять 144 т, что достаточно для восприятия нагрузок от причальной галереи.

Для определения величины осадок и распределения их во времени была создана конечно-элементная модель грунтового массива со свайным основанием и ростверком галереи (рис. 2).

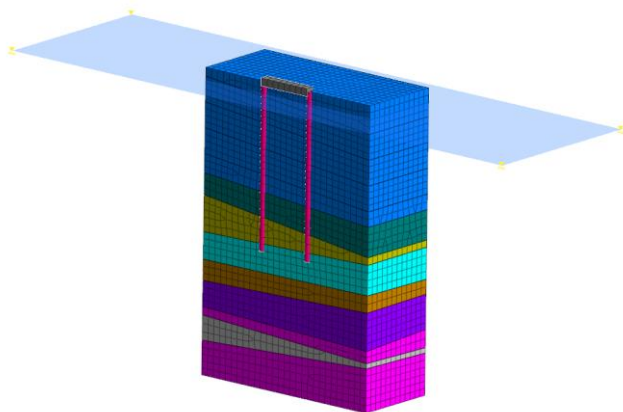


Рис. 2. Общий вид расчетной модели

Моделирование предполагало несколько стадий:

- создание грунтового массива;
- разработка котлована по проектному профилю;
- загрузка котлована засыпкой из песка;
- процесс уплотнения (консолидации) грунтов во времени в течение 6 лет.

Процесс загрузки котлована предполагал уплотнение нижележащих грунтов, разуплотненных в процессе разработки котлована, при этом подъем дна котлована составил около 350 мм. Затем следовал консолидационный процесс с осадкой около 300 мм (рис. 3).

Спустя полгода после окончания замыва пазухи причала начались ежемесячные наблюдения за осадками. Результаты наблюдений нанесли на расчетную кривую (рис.4).

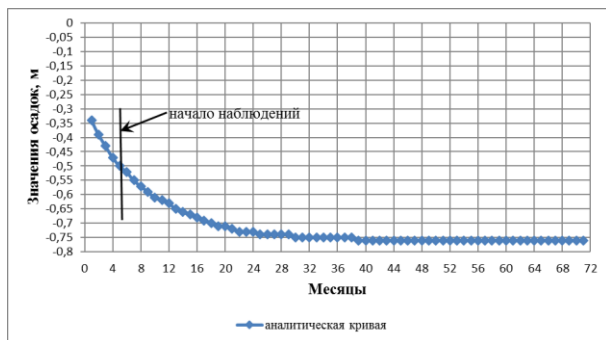


Рис. 3. График затухания осадка как результат расчета конечно-элементной модели

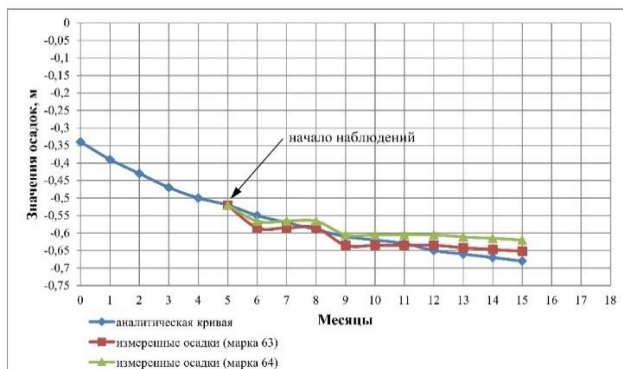


Рис. 4. Графики измеренных и рассчитанных осадок

Сопоставив графики значений измеренных и расчетных осадок, было отмечено следующее:

- интенсивность нарастания измеренных осадок меньше теоретических по четырем расчетным ростверкам;
- полученные величины изменения теоретических и измеренных значений осадок сходны между собой.

После анализа полученных результатов было предложено с целью прогноза динамики изменения наблюдаемых осадок использовать данные, полученные на конечно-элементной модели, в качестве процесса-аналога.

Для этого решено было провести аппроксимацию полученной на расчетной модели зависимости и с помощью этого уравнения продлить ряд

наблюдений (рис. 5). В дальнейшем планируется полученный график прогноза использовать для сравнения с результатами наблюдений. Совпадение величин осадок с результатами прогноза будет свидетельствовать о работе сооружения в штатном режиме.

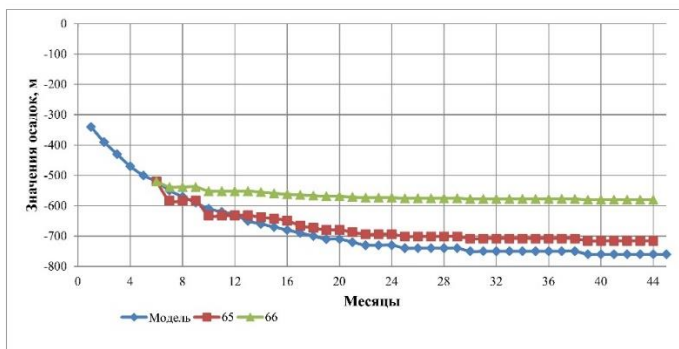


Рис. 5. Прогноз осадок ростверка

Выводы:

1. При небольшом периоде наблюдений за осадками сооружений на слабых грунтах для прогноза консолидационных процессов возможно использование конечно-элементной модели сооружения в качестве процесса-аналога.

2. Короткий ряд наблюдений необходимо использовать для оценки адекватности модели сооружения.

3. Увеличение продолжительности наблюдений до 20 месяцев и более позволит отказаться от использования модели-аналога (конечно-элементной модели) и опираться в прогнозе на результаты наблюдений, что увеличит его качество.

УДК 626.862.94

### Реконструкция дренажной системы побережья Черного моря г. Одесса

Куляк К. А., Анисимов К. И., Великий Д. И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*Рассмотрены вопросы долговечности фильтроскважин дренажной системы прибрежной части г. Одессы. На основе моделирования работы скважин получены их основные характеристики при различных условиях эксплуатации и даны рекомендации по реконструкции системы.*

Дренажная система прибрежной части г. Одессы является одним из элементов противооползневой защиты побережья. В эту систему кроме дренажа включены берегозащитные сооружения – волноломы, буны, траверсы, пляжи, уполоаживание откосов, создание систем поверхностного водоотвода, подпорных стен свайных рядов.

Дренажная система представлена в виде комбинации дренажных галерей, штолен и вертикальных поглощающих скважин и охватывает участок берега от Ланжерона до 16 станции Большого Фонтана. Геологические и гидрогеологические условия по всему участку побережья имеют относительно схожий характер: водовмещающие слои суглинков и супесей мощностью 15-30 м подстилаются водоупорным красно-бурыми суглинками и глинами. Вода, находящаяся в верхних слоях, имеет, как правило, техногенный характер, подпитываясь уечками из водонесущих коммуникаций города, а также бытовыми стоками частного сектора.

Под красно-бурыми глинами залегает слой понтических известняков мощностью от 5 до 15 м, которые подстилаются на отметках от +8,0 до +10,0 серо-зелеными глинами.

На подошве известняков залегает второй водоносный горизонт, мощность которого редко превышает 1 м.

Таким образом, возле побережья наблюдается два безнапорных горизонта, разделенных между собой водоупором мощностью от 5 до 15 м.

Перехват фильтрационных потоков обоих горизонтов производится в прирвовочной части склона.

Дренажная галерея, расположенная на подошве известняков, перехватывает воду понтического яруса.

Перехват вод четвертичного горизонта осуществляется одним рядом поглощающих скважин, забой которых выведен через шельгу галереи. Отвод воды из галерей производится штольнями через 2-3 километра по их длине. Доступ в галереи осуществляется через порталы штолен и стволы, устроенные на их пересечениях. Таким образом, вода из четвертичного яруса переносится в понтический, где перехватывается галереей.

Как правило, срок службы дренажных поглощающих скважин ограничивается 15-20 годами. Во-первых, это происходит из-за кольматажа фильтровой части и забоя и, во-вторых, из-за интенсивной коррозии стальных труб.

В настоящее время значительная часть скважин вышла из строя еще из-за того, что происходит интенсивная застройка прибрежной части склонов: скважины, попадающие в пятна застройки, попросту уничтожаются. Это вызывает необходимость реконструкции вертикального дренажа.

В процессе работы ставились такие задачи:

- решить вопрос о долговечности ствола скважины;

- решить вопрос о кольматаже фильтровой и забойной зоны скважины;
- определить оптимальный шаг скважин.

Для повышения долговечности ствола фильтроскважины предполагалось использование труб ПВХ, которые применяются для водозаборных скважин.

Избежать кольматажа известняка глинистыми частицами, которые вместе с фильтрационным потоком по контакту с внешней поверхностью трубы поступают в понтический ярус, было решено путём устройства скважины на подошве фильтровой части. Сальник представляет собой обмотку трубы ствола канатом с последующей заливкой литым бетоном слоем 400 мм.

Сальник должен предотвращать глинизацию известняка до тех пор, пока ствол скважины не будет плотно обжиматься красно-бурой глиной вследствие ее набухания. При уменьшении расстояния между скважинами расход ряда скважин будет расти, и на каком-то этапе этот рост будет несущественным.

Этому расходу будет соответствовать расстояние между скважинами, менее которого эффективность дренажа не будет возрастать. Для этой цели была смоделирована ситуация, где водовмещающий слой моделировался с осредненными коэффициентами фильтрации  $k_{xy} = 0,53$  м/сут,  $k_z = 1,07$  м/сут, поскольку лессовые грунты обладают достаточно выраженной фильтрационной анизотропией.

Поглощающие скважины моделировались фрагментом размером в плане в один элемент (1,0 м x 1,0 м) с коэффициентом фильтрации 20 м/сут с нулевым давлением на выходе. В зоне питания точечным образом прикладывался расход, равный 25 м<sup>3</sup>/сут, что равняется половине расхода в штольне, собирающей воду с участка проектирования.

Как правило, кривая депрессии на склонах при подходе к бровке падает до отметки водоупора, что объясняется дренирующим эффектом оползневых накоплений, находящихся в разуплотненном состоянии и со значительным содержанием раздробленных блоков известняка.

Исходя из сказанного, зона разгрузки моделировалась точками выхода в каждом элементе с нулевым давлением на отметке водоупора (рис. 1).

Шаг скважин задавался с интервалом в 5 м, то есть расстояния между скважинами составляли 5, 10, 15...45 м.

В проекте противооползневых сооружений, реализованном в 60-х - 80-х годах прошлого века, этот шаг равнялся 40-50 м.

Анализируя полученные результаты проведенных расчетов, можно отметить следующее:

- при увеличении шага скважин от 5 м до 45 м, расход в зоне разгрузки возрастает от 0,86 м<sup>3</sup>/сут до 7,02 м<sup>3</sup>/сут (рис. 2);



- расход системы скважин при этих же условиях снижается от 24,24 м<sup>3</sup>/сут до 17,09 м<sup>3</sup>/сут (рис. 3);
- снижение уровня грунтовых вод между скважинами в ряду при тех же условиях составляет от 5 до 2,9 м (рис. 4);
- количество скважин на участке, а следовательно, и их стоимость начинает резко возрастать, начиная от диапазона шага 20-25 м. (рис. 5);
- принятое в проекте расстояние между скважинами позволяет перехватить значительное количество воды, однако выход из строя даже одной скважины приведет к тому, что их шаг становится равным 90-100 м, то есть на участке в 100 метров работает одна скважина. Расход ее составляет 10 м<sup>3</sup>/сут при понижении уровня в районе скважины на 1,5 м.

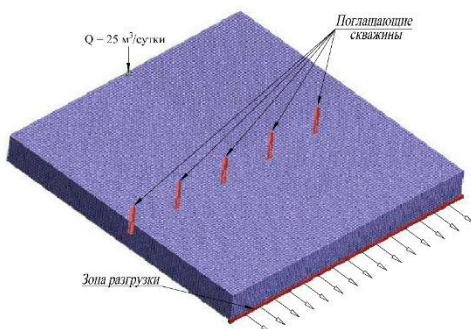


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

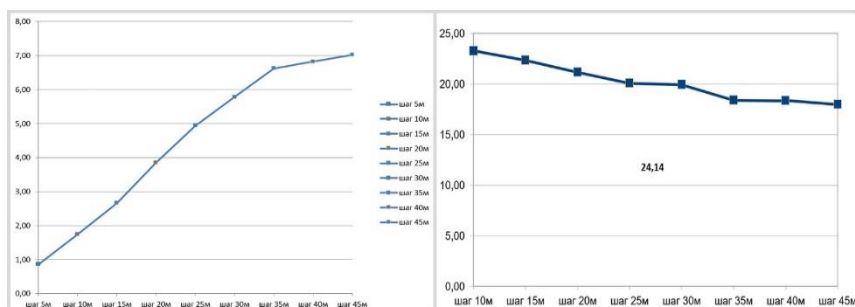


Рис. 2. Расход в зоне разгрузки при изменении шага скважин

Рис. 3. Суммарный расход скважин при различном шаге скважин

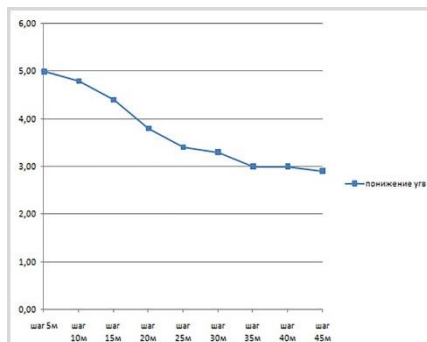


Рис. 4. Снижение уровня УГВ на участке проектирования

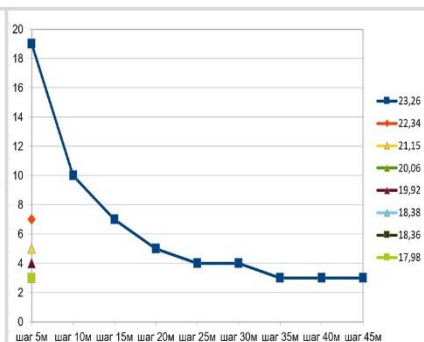


Рис. 5. Количество скважин в зависимости от шага

Насыщение склона водой также увеличивается, о чем свидетельствует появление выходов фильтрации в районах 10-16 станции Б. Фонтана.

Оптимальным шагом скважин может считаться расстояние в 20-25 м, что определяется как их количеством, так и эффективностью работы при условии постепенного выхода их из строя.

УДК 627.824.2/3:624.04

### **Влияние сезонных изменений температуры окружающей среды на устойчивость низового откоса грунтовых плотин**

Дмитриев С. В., Анисимов К. И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Одесса, Украина

*Приведена методика учета температурных воздействий на значение коэффициента устойчивости низового откоса грунтовой плотины. Установлена теоретическая закономерность между температурой фильтрующегося потока через тело земляной плотины в данной точке и скоростью фильтрации. Подобрано дифференциальное уравнение, описывающее изучаемый процесс, и определены граничные условия для этого уравнения.*

Одним из факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию грунтовых плотин, является положение кривой депрессии в теле сооружения. Сезонные температурные климатические изменения могут оказывать значительное влияние на положение депрессионной кривой и, как следствие, на его напряженно-деформированное состояние.

Образуемая вследствие колебаний температуры воды в верхнем бьефе температурная волна распространяется в тело плотины и постепенно затухает, что обуславливается двумя факторами: фильтрацией воды в грунте, слагающем сооружение, и теплопроводностью последнего. Такой характер распространения тепла соответствует конвективному теплообмену (1). Ограничиваясь линейной постановкой задачи и полагая скорость фильтрации постоянной, можно записать:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial T}{\partial x} U_x, \quad (1)$$

где  $T$  – функция изменения температуры,  $T = f(x, \tau)$ ;  $\tau$  – время;  $x$  – продольная координата;  $U_x$  – скорость фильтрации в проекции на ось  $X$ ,  $U_x = \text{const}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности водонасыщенного грунта тела плотины,  $\text{м}^2/\text{сут}$ .

Граничным условием для уравнения конвективной теплопроводности является уравнение колебаний температуры воды в верхнем бьефе. Строго говоря, в естественных условиях эти колебания не являются гармоническими и носят нестационарный пульсирующий характер, и здесь можно отмечать лишь общую закономерность периодического изменения температуры от минимальных значений зимой, до максимальных – летом.

Функция, аппроксимирующая исходную дискретную зависимость  $T_i(\tau_i)$ , может быть представлена в следующем виде:

$$T(\tau) = A \cos(\sigma\tau + \omega) + T_0 \quad (2)$$

Уравнение (2) фактически описывает гармонические колебания со следующими параметрами:  $A$  – амплитуда колебаний,  $^\circ\text{C}$ ;  $\sigma$  – циклическая частота,  $\sigma = \frac{2\pi}{365}$ ,  $\text{сут}^{-1}$ ;  $\omega$  – начальная фаза,  $\omega = \frac{2\pi}{365} \tau_0$ ;  $\tau_0$  – сдвиг по фазе от начала координат,  $\text{сут}$ .;  $T_0$  – среднегодовая температура воды в верхнем бьефе,  $^\circ\text{C}$ .

Решение уравнения (1) с граничным условием (2) было найдено как функция комплексных переменных. Такой подход упрощает решение и представляет его в более общем виде [1]. В дальнейшем из полученного решения выделяется действительная часть. Общий вид искомого решения:

$$T(x, \tau) = A e^{\alpha x + \beta \tau},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – комплексные коэффициенты.

Граничное условие (функция колебания температуры воды в верхнем бьефе плотины), в этом случае, примет вид:

$$T(0, \tau) = A e^{i \sigma \tau} = A [\cos(\sigma i) + i \sin(\sigma i)],$$

где  $\sigma$  – циклическая частота,  $\sigma = \frac{2\pi}{P}$ ,  $\text{сек}^{-1}$ ;  $P$  – сезонный период колебаний температуры воды в верхнем бьефе,  $\text{с}$ .;  $i$  – мнимая единица ( $i^2 = -1$ ).

Полученное решение представлено в виде:

$$T(x, \tau) = A e^{-Kx} \cos(\sigma\tau - cx) + T_0, \quad (3)$$

где  $K = \frac{1}{2a} \left[ \sqrt{\frac{r+U_x^2}{2}} - U_x \right]$  – декремент затухания ( $K > 0$ );

$c = \frac{1}{2a} \left[ \sqrt{\frac{r-U_x^2}{2}} \right]$  – циклическая частота колебаний по  $x$ ;

$r = \sqrt{U_x^4 + 16a^2\sigma^2}$ .

На основании уравнения (3) могут быть получены температуры фильтрационного потока в теле плотины в любой момент времени (рис. 1). Коэффициент фильтрации (рис. 2) является функцией температуры  $k = f(T)$  [2]. Применяя метод виртуальных длин Н. Н. Павловского можно получить виртуальную длину  $L_v$  каждого рассматриваемого отсека грунтовой плотины в необходимый момент времени на основании определенного в этом отсеке коэффициента фильтрации как функции температуры (4) и, как следствие, положение кривой депрессии в любой момент времени на основании полученных виртуальных длин отсеков плотины.

$$L_v = \frac{k_{\phi 0}}{k_{\phi}} L, \quad (4)$$

где  $L$  – длина отсека;  $k_{\phi 0}$  – коэффициент фильтрации тела плотины, приведенный к температуре  $10^\circ\text{C}$ ;  $k_{\phi}$  – истинное значение коэффициента фильтрации в выбранный момент времени в сечении грунтовой плотины с продольной координатой  $X$  на длине пути фильтрации при известной температуре  $T$ .

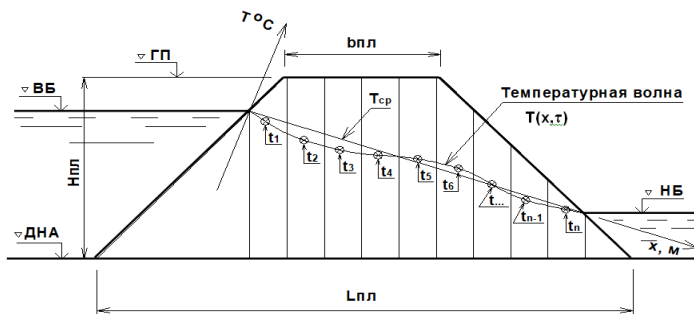


Рис. 1. Затухающая температурная волна  $T(x, \tau)$  в теле грунтовой плотины с разбивкой тела плотины на отсеки с указанием температур на участках

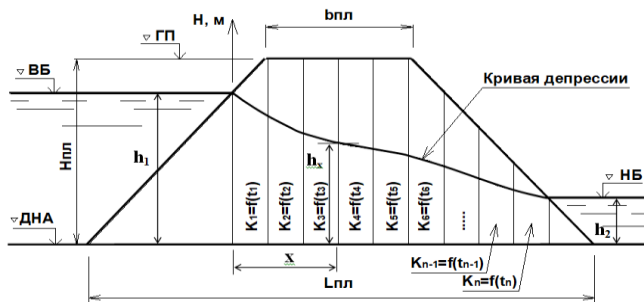


Рис. 2. Определение коэффициентов фильтрации в каждом расчетном отсеке в зависимости от температуры фильтрующейся воды

Влияние изменений температуры фильтрующейся воды на изменение положения кривой депрессии и напорной линии (в случае напорного режима фильтрации) также подтверждено рядом натуральных наблюдений на реальных сооружениях и лабораторных экспериментов [3], выполненных на кафедре гидротехнических сооружений Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Изменения положения кривой депрессии, вызванные сезонными изменениями температуры окружающей среды (рис. 3), приводят к изменениям физико-механических характеристик грунта тела плотины, и эти изменения носят динамический характер.

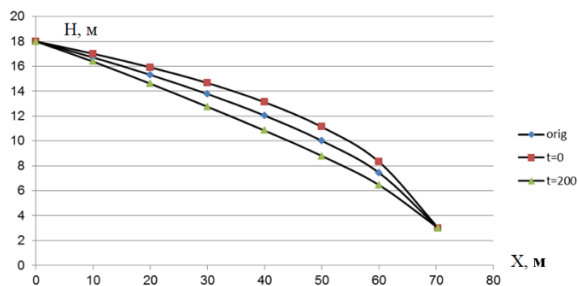


Рис. 3. Положения кривой депрессии в различные моменты времени с учетом и без учета температурных воздействий (тестовый пример: длина пути фильтрации 70 м, диапазон температур 15 °С,  $\tau = 0$  и 200 сут. от начала наблюдений)

В результате оценки влияния описанных факторов на значение коэффициента устойчивости низового откоса грунтовых плотин установлено, что

сезонные изменения температуры фильтрующейся воды в пределах 20 °С могут приводить к отклонению значения коэффициента устойчивости в диапазоне  $\pm 7\%$  от значения, полученного без учета изменений температуры, при этом значение коэффициента устойчивости может понижаться ниже требуемого нормами проектирования.

### Литература

1. Корн, Г., Справочник по математике для научных работников / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
2. Справочник по гидравлическим расчетам / под. ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
3. Дмитриев, С. В. Экспериментальное подтверждение решения задачи конвективного теплообмена в грунтовых сооружениях / С. В. Дмитриев // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. – Вип. 31. – Ровно: НУВГтП, 2006. – С. 133–138.

УДК 531.781.2

### **Оптимизация силового режима при скоростном ударном выдавливании биметаллических стержневых изделий**

Качанов И. В., Власов В. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Современное развитие промышленного производства требует применения высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение готовой продукции с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В связи с этим большими потенциальными возможностями обладают техпроцессы, основанные на использовании высоких скоростей деформирования.*

Для реализации высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение готовой продукции с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами может быть использован процесс скоростного горячего выдавливания (СГВ), создающий эффективные условия для обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов, широко используемых в тяжелом машиностроении, включая инструментальное производство. Эффективность СГВ дополнительно возрастает при изготовлении би- и триметаллического стержневого инструмента (толкателей, пуансонов, и т.д.) в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) [1, 2].

Однако для промышленного внедрения таких техпроцессов нужны сведения об оптимальных силовых режимах формоизменения, пиковых нагрузках, действующих на инструмент. Эти данные необходимы для расчета оптимальной энергии удара и подбора оборудования, способного развить данную энергию.

Рассмотрев известные решения, применительно к процессам как стационарного [3], так и нестационарного [4] скоростного прессования полосы, через клиновую матрицу, приведенным в работах [3, 4], авторы разработали рекомендации для расчета осесимметричной деформации (ОД). Для реализации перехода к ОД авторы этих работ рассматривали осесимметричную деформацию как суперпозицию двух переходов плоской деформации, реализуемых по схеме «круг-эллипс» и «эллипс-круг» в первом и втором переходах соответственно.

При этом считалось, что на первом переходе из цилиндрической заготовки диаметром  $D = 2R$  ( $R$  – радиус заготовки) выдавливается стержень эллиптического сечения с параметрами осей  $D = 2R$  и  $d = 2r$  (рис. 1, а). На втором переходе эллиптическая заготовка деформируется через круглое отверстие и превращается в цилиндрический пруток диаметром  $d = 2r$  (рис. 1, б).

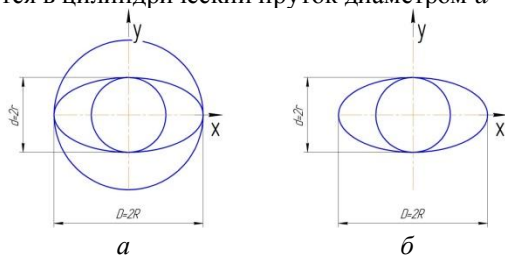


Рис. 1. Два перехода плоской деформации для моделирования формообразования в условиях ОД:  
 а – по схеме «круг-эллипс», б – по схеме «эллипс-круг»

На основании изложенного авторами, вместо достаточно сложного пересчета предлагается без снижения корректности переход от плоской к осесимметричной деформации в 2 этапа.

На первом этапе в зависимости для расчета усилия и мощности формоизменения, полученные для полосы с размерами  $A * b$  ( $A$  – высота заготовки,  $b$  – ширина, рис. 2, а) необходимо внести изменение. Суть изменения сводится к тому, что в рамках решения плоской задачи осуществляется формоизменение не прямоугольной полосы с площадью сечения  $f_n = A * b$ , а квадратной – с площадью  $f_{кв} = A^2$  (рис. 2, б).

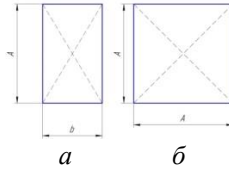


Рис. 2. Формы поперечных сечений заготовок, используемые для решения плоской задачи СГВ стержневых изделий:  
*a* – прямоугольная, *б* – квадратная

Очевидно, что кинематически возможное поле скоростей в части определения мощности формоизменения квадратной заготовки (в рамках принятых допущений) остается достаточно высокой.

Суть решения на 2-м этапе сводится к тому, что в полученных зависимостях для формоизменения квадратной заготовки площадь  $f_{кв} = A^2$  заменяют на равновеликую площадь круга  $f_{кр} = \pi D^2/4$  (рис. 3)

$$f_{кв} = f_{кр} \Rightarrow D = \frac{2A}{\sqrt{\pi}} = 1,128A \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр равновеликой осесимметричной заготовки, для которой рассчитывается усилие либо мощность формоизменения;  $A$  – сторона равновеликой по площади квадратной заготовки, используемая в решении плоской задачи (рис. 3).

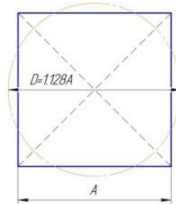


Рис. 3. Формы равновеликих площадей, квадратной и круглой заготовок, используемые для анализа ОД

Таким образом, используя полученное соотношение (1) по заданному из практических соображений диаметру  $D$  устанавливается площадь сечения квадратной заготовки  $A^2$ , а затем используя полученное решение плоской задачи рассчитываем силовой режим скоростного выдавливания для осесимметричной ступенчатой детали (рис. 4) с диаметром ступеней  $d_1, d_2, d_3$ , получаемой выдавливанием из исходной заготовки диаметром  $D$  и длиной  $L_3$ .



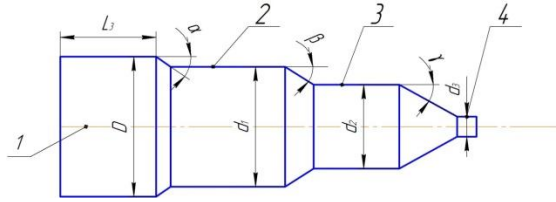


Рис. 4. Эскиз ассиметричной детали с диаметрами ступеней  $d_1, d_2, d_3$ , получаемой скоростным выдавливанием из исходной цилиндрической заготовки диаметром  $D$  и длиной  $L_3$

Для установления силового режима осесимметричной деформации используем теорию анализа процесса СГВ методом верхней оценки, применительно к получению плоскоступенчатой детали квадратного сечения со сторонами ступеней  $a_1, a_2, a_3$  из исходной заготовки квадратного сечения со стороной квадрата  $A$  и длиной заготовки  $L_3$ . В результате усилие  $P_{n1}$ , действующее на пуансон при выдавливании заготовки квадратного сечения из контейнера, через клиновую матрицу, можно определить по формуле:

$$P_{n,1} = \frac{A^2 \left\{ K \left[ F_1(\lambda_1, \mu_1, \alpha) + 4\mu \left( \frac{L_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1}}{A} \right) \right] + \rho V_{01}^2 [F_1(\lambda_1, \mu_1, \alpha)] \right\} M}{M + \rho A^3 \left[ F_3(\lambda_1, \mu_1, \alpha) + \frac{L_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1}}{A} \right]} \quad (2)$$

Разделив левую и правую части полученного выражения на площадь заготовки с квадратным сечением ( $S_3 = A_2$ ) получим выражение для расчета удельного усилия, действующего на пуансон при формоизменении заготовки в ОД1:

$$p_{n,1} = \frac{K \left[ F_1(\lambda_1, \mu_1, \alpha) + 4\mu \left( \frac{L_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1}}{A} \right) \right] + \rho V_{01}^2 [F_2(\lambda_1, \mu_1, \alpha)]}{\left\{ 1 + \rho A^3 \left[ F_3(\lambda_1, \mu_1, \alpha) + \frac{L_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1}}{A} \right] \right\} * M^{-1}} \quad (3)$$

Из анализа выражений (2) и (3) видно, что на величину усилия  $P_{n,1}$  и удельного усилия  $p_{n,1}$  влияют силы внутреннего сопротивления на поверхностях разрыва трения, динамические напряжения на поверхностях разрыва скорости, а также силы инерции от движения масс заготовки. Из выражения (3) видно, что с ростом массы стержневой части на выходе из ОД1 происходит снижение нагрузки, действующей на пуансон.

## Литература

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Мн: УП «Технопринт», 2002. – 327 с.
2. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 3–9.
3. Томленов, А. Д. Теория пластинчатого деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М: Металлургия, 1972. – 408 с.
4. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов. – Мн: УП «Технопринт», 2002. – 327с.

УДК 631.67

### **К определению коэффициента недостатка насыщения грунтов при подпочвенном увлажнении**

Селезнев В. И., Казьмирук Д. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основании детального анализа эмпирических и теоретических данных получено уравнение зависимости коэффициента недостатка насыщения торфа от режимобразующих факторов. В статье освещается необходимость разделять понятия коэффициента недостатка насыщения грунтов и удельной водоотдачи.*

В настоящее время большое внимание уделяется реконструкции существующих осушительно-увлажнительных систем на торфяно-болотных маломощных почвах, которые занимают площадь около 922 тыс. га сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь [1].

При определении расстояний между дренами необходимо учитывать сезонные факторы, поэтому в формулы расстояний между дренами-осушителями входит параметр водоотдачи грунтов, а между дренами-увлажнителями – недостаток насыщения грунтов. В условиях неглубокого залегания грунтовых вод, меньших мощности капиллярной каймы коэффициент недостатка насыщения грунта  $\mu$  не будет равен коэффициенту водоотдачи  $\delta$ , так как  $\mu$  зависит от профиля влажности до и после колебания УГВ.

Во многих действующих нормативных документах по проектированию и реконструкции гидромелиоративных систем коэффициент недостатка насыщения почв принят равным коэффициенту водоотдачи, что справедливо для

аридной зоны, поскольку только на большой глубине (2,5-3,0 м) естественная влажность грунта близка к наименьшей влагоемкости. При работе дренажа в гумидной зоне (глубина закладки дрен 1,0-1,4 м) уровень грунтовых вод (УГВ) колеблется в пределах небольших глубин от поверхности земли и величина коэффициента недостатка насыщения  $\mu$  зависит от запасов влаги в капиллярной кайме и положения УГВ торфяно-болотных почв.

Оба коэффициента – и водовместимости, и недостатка насыщения почвы определяют по зависимости

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta h}, \quad (1)$$

где  $\Delta V$  и  $\Delta h$  – изменение водовместимости и УГВ в исследуемом слое почвы.

*Водоотдача* различных грунтов определялась в лабораторных условиях использованием капилляриметра. Метод определения заключается в следующем: из образца почвы небольшой высоты (5 см), полностью насыщенного водой, производилось отсасывание влаги с помощью последовательно растущего разрежения. Чтобы не происходило прорыва воздуха через наиболее крупные поры образца, он помещается в тонкопористый фильтр (воронка Шотта), поры которого настолько мелки, что капиллярные мениски в них поддерживают необходимое разрежение. Образцы торфа объемом 50 см<sup>3</sup> отбирались на участке «Хвоецкое». По результатам определений получают величину текущей водоотдачи и зависимости от глубины опускания.

Сопоставление удельной водоотдачи торфа, вычисленное по формуле (2) и полученного в лабораторных условиях показало, что максимальное отклонение результатов составляет 24 % при понижении УГВ от поверхности земли до нормы осушения 0,6 м, что говорит о достаточно высокой точности формулы (2) и пригодности метода капилляриметра для определения водоотдачи торфа.

С учетом климатических факторов и коэффициентов фильтрации торфа и песка численным способом получено уравнение связи коэффициента удельной водоотдачи торфяно-болотных почв с режимобразующими факторами:

$$\delta = 0,098 \cdot k^{0.333} \cdot h^{0.15} \left( \frac{\sum D + 1}{\sum N + 1} \right)^{0.333}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации торфа, м/сут;  $h$  – уровни грунтовых вод, м;  $\sum D$  – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха с начала вегетации на дату определения, мб;  $\sum N$  – сумма осадков с начала периода вегетации на дату определения, мм.

*Коэффициент недостатка насыщения* торфяно-болотных маломощных почв (глубина торфа 50-100 см) определяется различными методами: по данным лабораторных исследований, по данным наблюдений за изменением влажности почв зон аэрации, путем расчетов по уравнениям неустановившегося движения грунтовых вод, по подъему УГВ после

выпадения дождя, по водовместимости, по данным опытных водопонижений и кустовых откачек.

Авторами использован метод определения недостатка насыщения почв по водовместимости из-за его основного преимущества: он возможен в естественных условиях залегания почвогрунтов, учитывает не только структуру отдельных слоев, определяемых физико-механическими свойствами входящих компонентов, но и особенности в строении, определяемыми местными условиями залегания в природе (макропоры, трещины, ходы и т.п.).

Водовместимость отдельных почвенных слоев определялась путем слойного суммирования объема свободных пор по вертикали от поверхности земли до УГВ. Расчеты выполнялись по данным непосредственных наблюдений за режимом УГВ и соответствующим ему режимом влажности торфа на опытно-производственном участке Хвоецкое. Мощность торфа на участке изменяется от 0,6 до 1,2 м, подстиляется торф пылеватым и мелкозернистым песком. Средняя водовместимость торфа составляет 1,10 м/сут.

Влажность торфа определяли термостатно-весовым способом в репрезентативных точках через каждые 10 дней в течение всего вегетационного периода. УГВ измеряли через день летом и осенью и каждый день в период снеготаяния и при проведении увлажнительного шлюзования.

Коэффициент недостатка насыщения  $\mu$  определялся по изменению влажности почвогрунтов от поверхности земли до уровня УГВ через 10 см по вертикали.

Периодические снижения УГВ освобождают поры грунта от воды и создают недостаток насыщения. Последующие подъемы уровня вновь заполняют поры водой, поэтому режимные наблюдения за УГВ после выпадения осадков и до их выпадения могут служить основанием для определения коэффициента  $\mu$  торфа в его естественном залегании.

Для учета климатического фактора брались осадки и дефицит влажности воздуха, поскольку суммарное испарение определить довольно сложно. Анализ данных коэффициента недостатка насыщения торфа и отношения дефицита влажности воздуха к атмосферным осадкам на дату определения, считая с начала периода вегетации, свидетельствует о линейной и тесной зависимости соотношения недостатка насыщения торфа и климатического фактора на логарифмической шкале координат.

Зависимость коэффициента недостатка насыщения торфа от положения УГВ относительно поверхности земли носит степенной характер.

В. И. Ионат, моделируя неустановившееся движение в щелевом лотке получил, что водоотдача пропорциональна  $K^{0,333(59)}$ . По зависимости (1), предложенной А. И. Ивицким, удельная водоотдача торфа пропорциональна  $K^{0,375}$ . Преобразования К. Я. Кожанова также показывают, что удельная водоотдача торфа будет пропорциональна  $K^{0,315}$ .

Таким образом, коэффициент недостатка насыщения торфа, как и удельная водоотдача торфа, пропорционален  $K^{0,333}$ .

На основании численного решения получено следующее уравнение зависимости коэффициента недостатка насыщения торфа с режимобразующими факторами:

$$\mu = 0,135K^{0,333}h^{0,25} \left( \frac{\sum D+1}{\sum N+1} \right)^{0,333}, \quad (3)$$

где обозначения те же, что и в формуле (2).

### Литература

1. Современное состояние почвенноземельных ресурсов Беларуси [Электронный ресурс]: URL: <https://geo.bsu.by/images/pres/soil/kml/kml03.pdf> – Дата доступа 20.05.2020.

2. Ивицкий, А. И., Афанасик Г. И., Михальцевич А. И. Проектирование и расчеты регулирующей сети осушительно-увлажнительных систем на торфяных почвах (рекомендации). – Минск : Ураджай, 1979 – 80 с.

3. Маслов, Б. С. Режим грунтовых вод переувлажненных земель и его регулирование // Б. С. Маслов. – М. : Колос, 1970. – 231 с.

4. Гладышев, С. В. Севриков, А. А. Результаты исследования водоотдачи грунтов / Сб. науч. тр. Сев.НИИГиМ Пути повышения эффективности мелиоративных систем в Нечерноземной зоне РСФСР. Л., 1982. – С. 74–78.

5. Микаловичус, Ю. Исследование осушения и увлажнения мелкозалежных торфяников (на примере польдера Миния) / Машинное осушение затопливаемых пойменных земель, вып.2 Елгава, 1977. – С. 134–139.

УДК 631.459.31+627.8

### **Деформационные процессы береговых склонов водохранилищ Республики Беларусь на современном этапе их эксплуатации**

Кобяк В. В.

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

*В статье приведены результаты рекогносцировочных и стационарных натурных наблюдений за процессами, происходящими в береговой зоне водохранилищ Республики Беларусь в период с 2006 по 2019 гг. На примере ряда водохранилищ установлены причины регенерации процессов деформации коренных берегов, определены основные берегоформирующие факторы и условия. Определены масштабы и интенсивность протекания процессов переработки береговых склонов в зависимости от гидрологических условий эксплуатации водохранилищ.*

Создание водохранилищ наряду с несомненной их экономической выгодой влечет за собой ряд негативных последствий в процессе их эксплуатации. К числу таких следует отнести разрушение коренных берегов – абразия, заболачивание и подтопление территории, переосушивание поймы, изменение качества вод, эрозия и многое другое. Однако наиболее опасным является абразия берегов при ветро-волновом воздействии в сочетании с амплитудой колебания, в результате чего разрушаются селитебные территории, происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, что приносит ущерб сельскому хозяйству [1]. Зачастую в потенциальную зону разрушения береговых склонов попадают населенные пункты, объекты культуры и др.

Исследования, проведенные на территории Беларуси [2, 3], указывают на то, что абразия берегов водохранилищ стабилизируется в течение 10–20 лет их эксплуатации. В то же время стационарные исследования, проведенные с 2006 по 2019 гг., выявили признаки активизации (регенерации) береговых процессов на ряде водохранилищ страны, прошедших стадию их стабилизации [4].

Согласно последним данным, на территории Беларуси насчитывается более 150 водохранилищ [4]. Сеть наблюдений за процессами абразии охватила 43 разнотипных водохранилища (речные, озерно-речные, озерные, наливные), размещение которых по территории Беларуси представлено на рис. 1.

В ходе проведения натурных исследований были установлены возможные причины регенерации переработки береговых склонов на малых равнинных водохранилищах Республики Беларусь, определены возможные масштабы и динамика данных процессов на современном этапе их эксплуатации, проведено сопоставление имеющихся фондовых материалов и данных, полученных по результатам натурных наблюдений за абразионными процессами за последние 10 лет.

В программу натурных наблюдений и исследований входило измерение высоты коренного берега, определение ширины подводной части и глубины на внешнем краю отмели, общей протяженности береговой линии, подверженной абразии, а также отбор образцов грунта, слагающего береговой склон. По результатам исследований были построены поперечные профили береговых склонов с их морфологическим и морфометрическим описанием.

Проведенные наблюдения выявили развитие процессов деформации береговых склонов на 35 из 43 водохранилищах, т.е. на 80 % от общего количества изученных водоемов.

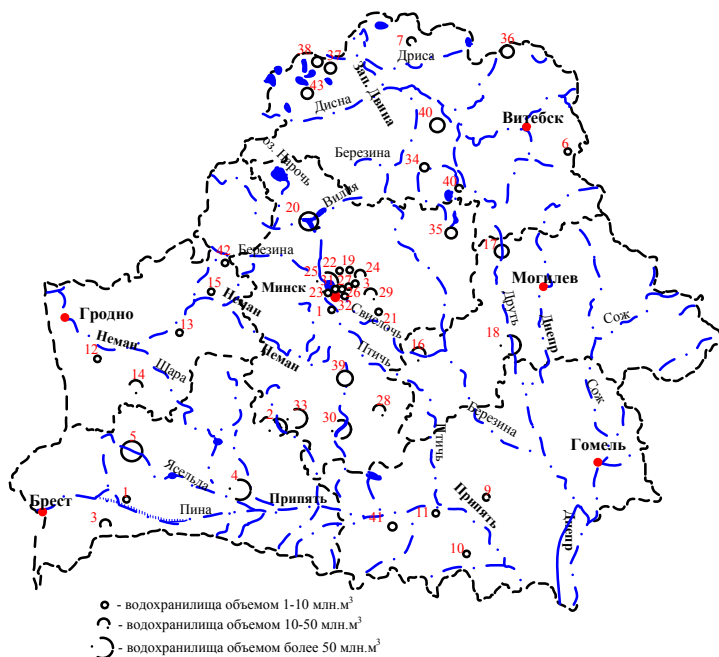


Рис. 1. Карта-схема размещения водохранилищ Беларуси:

- 1 – Птичь, 2 – Локтыши, 3 – Раубичи, 4 – Погост, 5 – Селец,  
 6 – Добромысленское, 7 – Клястицкое, 8 – Лукомское, 9 – Автюки,  
 10 – Княжеборское, 11 – Лешненское, 12 – Волповское, 13 – Гезгальское,  
 14 – Зельвенское, 15 – Лаздунское, 16 – Осиповичское, 17 – Тетеринское,  
 18 – Чигиринское, 19 – Острошицкий Городок, 20 – Вилейское,  
 21 – Волма, 22 – Вяча, 23 – Дрозды, 24 – Дубровское, 25 – Заславское,  
 26 – Комсомольское озеро, 27 – Криница, 28 – Любанское,  
 29 – Петровичское, 30 – Солигорское, 31 – Цнянское, 32 – Чижовское,  
 33 – Краснослободское, 34 – Лепельское, 35 – Селявское,  
 36 – Езерищенское, 37 – Хоробровк, 38 – Браславское,  
 39 – Рудня, 40 – Гомельское, 41 – Завойть,  
 42 – Жемыславское, 43 – Дривяты

В результате обработки данных натуральных наблюдений было установлено, что основными источниками регенерации (повторного развития) процессов переработки береговых склонов в условиях малых равнинных водохранилищах Беларуси являются изменение уровня режима, а также форма и расположение водоема в плане.

Изменение уровненного режима с его повышением и дальнейшее ветроволновое воздействие на береговой склон (при новом положении уровня воды в водоеме) происходило по разным причинам.

В период эксплуатации *Осиповичского водохранилища* с 1955 года средняя величина линейной переработки по 9 створам с общей протяженностью более 1,5 км составила более 10 м. Длительность процесса берегоформирования, по результатам наблюдения Левкевича Е.М., составила около 15 лет.

Введение в эксплуатацию Вилейско-Минской водной системы (далее – ВМВС) в 1978 году и переброска части стока из р. Вилия в р. Свислочь привели к тому, что Осиповичское водохранилище, которое по характеру регулирования стока относилось к группе водоемов недельно-суточного регулирования, перешло к сезонному регулированию. Это привело к увеличению обеспеченности активных уровней почти до 90 % и переходу по уровненному режиму в верхнем бьефе от первой группы водоемов ко второй.

Зарегулирование естественных водоемов (озер) при создании малой гидроэлектростанции на *Лепельском озере* вызвало поднятие отметок уровня воды более чем на 3,5 м. Данные натурных наблюдений, проведенных на трех участках по 9 створам, показали, что переработка береговой линии наблюдается в южной, юго-восточной и восточной частях водоема, на что указывают материалы профилирования береговых склонов (рис. 3). Длина разгона волны на данных участках совпадает с действием ветров южного и западного направлений в безледный период.

Наименьшей абразии подвержены берега, расположенные в северо-восточной части Лепельского водохранилища. Длина береговой линии составляет более 0,5 км при высоте коренного берега более 12 м. Величина линейной переработки за 7 лет составила более 2,5 м (рис. 2).



Рис. 2. Переработка береговой линии в северо-восточной части Лепельского водохранилища

Нарушение режима эксплуатации гидротехнических сооружений в результате отсутствия контроля за организацией регулирования пропуска воды на *Краснослободском водохранилище* привело к резкому поднятию уровня



воды (в течение одного сезона) выше проектных отметок, что вызвало разрушение берегового склона с величиной линейной переработки более чем на 3,5 м. Протяженность участков размыва в плане составила более 450 м. Береговой обрыв имеет высоту 1...1,2 м (рис. 3).



Рис. 3. Створы № 1 и № 2 на Краснослободском водохранилище

После введения в 1955 году Заславского водохранилища [5] наблюдения за переработкой коренных берегов производили по четырем участкам общей протяженностью более 3 км, расположенным в юго-восточной части водоема. Через 15 лет эксплуатации абразионные процессы стабилизировались. Введение в 1976 году в эксплуатацию ВМВС вызвало изменение уровневого режима во всех водохранилищах, расположенных в каскаде, в результате чего ранее стабилизированные (подверженные переработке) берега перешли в новую генетическую группу (стадию) – абразионную. Переработка коренных берегов проявилась в северной части Заславского водохранилища на участке протяженностью более 300 м. Высота абразионного уступа склона составила 0,5...5,5 м.

Сравнение и анализ морфометрических и морфологических показателей надводной части береговых склонов показали, что абразии наиболее подвержены обрывистые берега по сравнению с пологими склонами, высота которых колебалась 0,7...1,0 м с уклоном 70...89 градусов.

Проведенные натурные исследования на водохранилищах позволили сделать следующие выводы:

- переработка коренных берегов наблюдается на 35 из 43 обследованных водоемов;
- протяженность береговой линии, затронутой процессами абразии, составила 26,6 км при средней величине линейной переработки берега 10–20 м, достигающей на некоторых водохранилищах 30 м (Заславское, Лепельское);
- активизация данных процессов обусловлена в первую очередь изменением гидрологического режима водоема: поднятием уровня воды, увеличением обеспеченности активных уровней, изменения амплитуды колебания и т.д, а также расположение водоема в плане.

## Литература

1. Левкевич, В. Е. Оценка ущерба от абразионных риск-процессов на водных объектах Республики Беларусь / В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, С. М. Пастухов, М. С. Кукушинов, А. В. Бузук // Вест. Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 2(8). – С. 69–72.
2. Левкевич, В. Е. Переработка берегов малых равнинных водохранилищ мелиоративных систем, её прогноз и управление (на примере Белорусской ССР): дис. канд. техн. наук: 06.01.02 / В. Е. Левкевич. – Минск, 1986. – 135 с.
3. Широков, В. М. Методические рекомендации по оценке воздействий малых водохранилищ на окружающую среду / В. М. Широков, П. С. Лопух, В. Е. Левкевич; под ред. В. М. Широкова. – Минск: Белгосуниверситет, 1995. – 68 с.
4. Кобяк, В. В. Результаты лабораторных и натуральных исследований береговых процессов водохранилищ Беларуси // В. В. Кобяк // Весн. Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 1 (13). – С. 15–22.
5. Переработка берегов малых водохранилищ. Ч. IV. Основные выводы из результатов наблюдений и исследований 1961 г.: отчет о НИР / Белорусский политехнический ин-т; рук. темы М. Т. Солдаткин. – Минск, 1962. – 57 с.

УДК 631.459.31+627.8

### **Анализ причин и последствий гидродинамических аварий на водных объектах, связанных с разрушением береговых склонов**

Бузук А. В., Кобяк В. В., Миканович Д. С.  
Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

*Приведены сведения об авариях на гидротехнических объектах в мировой практике и в Беларуси, вызванные разрушением береговых склонов, проанализированы их причины, отмечены основные направления по предотвращению чрезвычайных ситуаций.*

Анализ литературных и справочных материалов, картографических изданий указывает на наличие большого количества водных объектов в непосредственной близости от городов, где проживает достаточно большое количество людей. Особенность такого расположения объясняется хозяйственно-питьевыми, рекреационными, промышленными и другими нуждами, в том числе и для устройства гидроэлектростанций [1]. Принимая во внимание все положительные стороны при эксплуатации гидротехнических сооружений (далее – ГТС), стоит учитывать и возможность возникновения

гидродинамических аварий с повреждением и разрушением плотин (дамб, шлюзов, перемычек), образованием волн вытеснения и волн прорыва, образованием зон затопления, сопровождающихся большим ущербом. Наиболее разрушительной является образование волны вытеснения при обвалах и оползнях пород большой массы.

Территория Республики Беларусь является водоразделом бассейнов Балтийского и Черного морей. Примерно 55 процентов речного стока приходится на реки бассейна Черного моря и 45 процентов – Балтийского. По территории республики протекает семь больших рек (Западная Двина, Западный Буг, Неман, Днепр, Припять, Виляя, Березина). Реки и их притоки питают водой искусственно созданные водохранилища, пруды, а также и озера [2].

В работах многих авторов надежность плотин и водохранилищ, построенных в разных странах мира, характеризуется на достаточно высоком уровне [3]. Несколько таких объектов продолжают по сегодняшний день безотказно работать, к примеру, плотина Khlongkathun в Таиланде построена в 543 г. до н.э. (эксплуатируется уже более 2500 лет).

Аварии на ГТС случаются ежегодно и сопровождаются катастрофическими последствиями. Случаи фиксируются во многих странах мира, но далеко не везде становятся известны не только широкой общественности, но и специалистам. С учетом данных мировой статистики, в среднем за последние 100 лет, начиная с 1900 года, ежегодный риск разрушений и повреждений бетонных плотин составляет соответственно  $0,34 \times 10^{-4}$  и  $0,45 \times 10^{-3}$  1/год, при этом ежегодный риск человеческих жертв аварий всех типов плотин составляет  $5,110^{-8}$  [4].

Нормы различных стран оценивают вероятность возникновения аварий  $10^{-3} \div 10^{-5}$  1/год как безопасное значение. Вероятность аварий на ГТС имеет тенденцию роста, особенно после их эксплуатации более 30 лет [4]. В Республике Беларусь 57 водохранилищ эксплуатируются более 30 лет, что составляет 37,7 % от их общего числа.

Данные бюллетеня Международной комиссии по большим плотинам ICOLD (International commission of Large Dams) показывают [5]:

- на больших плотинах (высотой более 15 м) 45-50 % аварий связано с недостаточной надежностью основания, 27-37 % – с недостаточной водопропускной способностью и 7-14 % – с низким качеством работ;
- за период с 1830 по 1986 г.г. в 43 странах мира произошли 534 аварии на 466 плотинах;
- на плотинах высотой свыше 15, построенных с 1900 по 1975 гг., произошло 290 аварий (из них 200 аварий носили катастрофический характер);
- в прошлом столетии на малых плотинах произошло 78 аварий, на плотинах высотой от 5 до 15 метров – 98 аварий, на строящихся плотинах – 68 аварий и инцидентов.

Причины аварий на водных объектах обуславливаются разнообразием климатических, топографических, геологических, гидрогеологических факторов и условий в створах плотин, а также их неблагоприятным сочетанием. Важную роль играет конструкция плотин, свойства материалов, использованных при их возведении, и применяемая технология строительства. Показатель надежности зависит не только от качества построенного сооружения, но и от качества обслуживания в процессе эксплуатации.

Основными причинами возникновения наиболее разрушительных аварий на ГТС являлись:

- сверхрасчётные (катастрофические) паводки: речная дамба на р. Янцзы (Китай), Зербино (Италия), Мольпасье (Франция), Орос (Бразилия), Болдуни Хилз (США), «Большая вода» (р. Эльба, Германия), Пасни (Пакистан), р. Чу (Вьетнам);
- ошибки при проектировании и строительстве: Сент-Франсис (США), Бейлис (США), Става (Италия);
- горные обвалы и сели: плотина Вайонт (Италия), Лития Бей на Аляске (США), Хоук Крик (США), Лейк Леон (Норвегия), р. Колумбия (США);
- чрезвычайные ситуации (далее – ЧС), связанные с горными обвалами и селевыми потоками, привели к большому количеству пострадавших и значительному материальному ущербу.

В результате схода оползня на плотине Вайонт пострадало более 4 тысяч человек. Такая проблема существует и в наше время, на укрепление берегов китайской ГЭС на реке Янцзы («Три ущелья») выделяется более \$1,5 млрд.

Разрушение береговых склонов водохранилища, откосов плотины имеют повторяющийся для большинства объектов характер. Современные технологии строительства позволяют размещать ГТС в сейсмоактивных районах, однако безопасность объекта значительно уменьшается. Монолитные бетонные конструкции не теряют своих функций, но вытесненный волной и подтоплением территории объем воды наносит ущерб в нижнем бьефе. Обрушению берегов могут предшествовать подъемы уровня воды, критические паводки, обильное выпадение осадков. Смачивание частиц грунта приводит к увеличению массы породы, ее частичной целостности в объеме, повышению скольжения по глинистым и суглинистым пластам грунта. В разрушении берегов важную роль играет волновое воздействие ветра, судов, изменение уровня воды.

В Республике Беларусь для реки Неман характерны песчаные и суглинистые основания берегов, склоны на большей части обрывистые, крутые. Для реки Западная Двина характерны глинистые и суглинистые основания с каменными отложениями. По характеру течения, форме берегов вышеупомянутые реки схожи с горными реками. Русло течения рек постоянно меняется из-за эрозии берегов, просадки грунтов и других факторов.

В совокупности вышеизложенные явления приводят к ЧС на водных объектах. Ежегодно происходит обрушение берегов как на реках, так и на водохранилищах, озерах, прудах и карьерах. В зависимости от наличия людей и материальных объектов в опасной зоне будет различен и ущерб. Самые крупные аварии такого типа в мире занесены в табл. 1.

Таблица 1

Крупные аварии на плотинах мира вследствие обрушения пород

Название плотины	Год разрушения	Причина	Количество пострадавших, чел.	Последствия
Рио-Барранкаская (Аргентина)	1914	Разрушение плотины вследствие оползня	7000	Два небольших города были разрушены, многочисленные ранчо и фермы уничтожены на протяжении 60-километров долин Рио Барранкас и Рио-Колорадо
Лития Бей (США)	1936	Обрушение пород в водохранилище	-	Подводный оползень вызвал всплеск воды у берегов водохранилища высотой 30,5 м
Понтезей (Италия)	1959	Обрушение пород в водохранилище	-	Оползень разделил водохранилище на две части, волной смыты несколько поселений в долине
Плотина Вайонт (Италия)	1963	Обрушение пород в водохранилище	Более 4 тыс.	Полное разрушение ГТС, мостов, промышленных объектов

На протяжении столетия в белорусской гидроэнергетике случаев крупных аварий не наблюдалось, однако обрушения, обвалы, сели и образование оврагов были замечены на водоемах республики. Имели место и инциденты с гибелью людей (табл. 2).

Основными причинами потери устойчивости откосов и склонов являются:

- устройство недопустимо крутого откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному;
- увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирова-

ние материалов на откосе или вблизи его бровки);

– изменение внутренних сил (увеличение удельного веса грунта при возрастании его влажности или, напротив, влияние взвешивающего давления воды на грунты);

– неправильное назначение расчетных характеристик прочности грунта или снижение его сопротивления сдвигу за счет, например, повышения влажности;

– проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и др.).

Таблица 2

Обрушения грунта с гибелью людей в Республике Беларусь

Название	Год разрушения	Причина	Последствия
р. Припять (Петриковский район)	2010	Обрушение берега вследствие эрозии	Два человека погибло
Карьер д. Пырщина (Глубокский район)	2014	Обрушение склона карьера	Вследствие обрушения берега карьера погибли 2 ребенка
Карьер «Хмельевские пруды» (Заславль)	2015	Обрушение дамбы	Вследствие обрушения откоса дамбы погрузились в воду 4 единицы техники вместе с водителями.

Для водных объектов Республики Беларусь наиболее характерны обвалы слоев грунта, обвалы камня и грунта в смеси, причем обвалы характерны не только для рек Неман (г. Гродно, Коложская церковь, 1853 г., 1884г., 1889 г.; д. Дубно, Мостовский р-н), Западная Двина и Днепр, но и для равнинной Припяти, озера Нарочь и крупных водохранилищ страны.

Обрушения берегов на реке Неман, главной причиной которых является эрозия берегов и фильтрация в слоях грунта, были зафиксированы в 1853, 1884, 1889 годах в Гродненском районе, ежегодно в д. Дубно Мостовского района. Периодически происходят обрушения на реке Западная Двина.

В 2006 году под угрозой обрушения попал жилой дом, построенный на берегу. Берега реки Припять имеют в большинстве своем пологие берега, не представляющие опасности обвала. Русло реки имеет большое количество изгибов, затонов, стариц. На изгибах в местах с интенсивным движением, как правило, и происходит эрозия и обвал берега. За последние годы на реке Припять и ее притоках подобные обрушения произошли в 2010 и 2016 годах.

Обвал 2010 года в Петриковском районе лишил жизни двух человек. Обвалы 2016 года произошли в г. Мозыре. Высота обвала составила около 20 м. Зафиксированы трещины и сползание грунта на берегах озера Нарочь в Мядельском районе.

ГТС являются сложными системами, состояние и поведение которых в экстремальных ситуациях иногда трудно моделировать и прогнозировать. Можно выделить следующие причины аварий:

- из-за гидрометеорологических факторов, которые способны превысить мыслимые и задаваемые в технических заданиях условия по осадкам;
- из-за недооценки и низкого уровня проведения геологической разведки в будущей котловине водохранилища и откосов;
- из-за низкого уровня специальных и научных знаний о протекающих процессах в ГТС и котловинах водохранилищ;
- нарушения правил эксплуатации ГТС.

На основании вышеуказанного можно определить основные причины, приводящие к формированию волны вытеснения:

- обрушение неустойчивых откосов;
- землетрясения;
- сдвиг пород и сход оползня.

Таким образом, для территории Республики Беларусь характерны обвалы береговых откосов вследствие эрозии, сдвиг пластов грунта, сход оползня вследствие ливней, что является предпосылками для возникновения и дальнейшего развития ЧС на водных объектах страны.

### **Литература**

1. Бонч-Осмоловская, Н. Е. Механика жидкости и газа. Лабораторный практикум: [учебное пособие/ Н. Е.Бонч-Осмоловская [и др.], под ред. И. В. Качанова и В. Н. Юхновца. – 4-е изд., перераб. и доп.. – Мн.: БНТУ, 2006. – 299 с.
2. Ломтадзе, В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород: руководство к лабораторным занятиям по инженерной геологии / В. Д. Ломтадзе, – Л.: Недра, 1972. – 312 с.
3. Арзуманов, Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / Э. С. Арзуманов. – М.: Энергия, 1978. – 385 с.
4. П 12-83 Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. – ВНИИГ, Ленинград, 1983. – 95 с.

# **Технологии преподавания технических дисциплин**



**Болометрический детектор**

Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В работе рассматриваются пути повышения пространственного разрешения болометрического детектора на термочувствительных плёнках при одновременном увеличении быстродействия. Приведены структурная схема и принцип работы разработанного детектора. Показано, что уменьшение габаритов позволяет при создании на его основе матричного инфракрасного приемника повысить пространственное разрешение в 1,5 раза при одновременном увеличении быстродействия.*

В субмиллиметровом диапазоне длин волн наиболее эффективными приемниками являются болометры, т. е. устройства, у которых чувствительным элементом [1] является поглотитель, нагревающийся под действием излучения [2-4]. Болометр – это прибор, предназначенный для индикации и измерения теплового излучения (оптического или инфракрасного (ИК) диапазона частот электромагнитного излучения).

Целью данной работы является повышение пространственного разрешения устройства на термочувствительных плёнках при одновременном увеличении быстродействия.

На рис. приведены вертикальный разрез (рис., а) и вид сверху (рис., б) устройства.

Первая 1 и вторая 2 болометрические пленки выполнены методами фотолитографии и плазмохимического газофазного осаждения из аморфного гидрированного кремния. Подложка 3 – это стандартная пластина высокоомного кремния. Площадь второй болометрической пленки 2 равна площади металлической пленки 4. Металлическая пленка 4 толщиной 0,5 мкм выполнена методами вакуумной технологии из нихрома. Диэлектрическая пленка 5 – это слой окиси кремния толщиной 0,2 мкм, полученный термическим окислением кремния. Светоотражающая пленка 6 толщиной 0,6 мкм выполнена методами вакуумной технологии из алюминия. Открытая резонансная структура 7 – это как минимум две проводящие структуры 8 треугольной формы, выполненные из пленок хрома толщиной 0,5 мкм методами вакуумной технологии с топологией, приведенной на рис., б. Первые 9 и вторые 10

центральные самоподобные элементы треугольной формы - это удаленные части из проводящих структур 8.

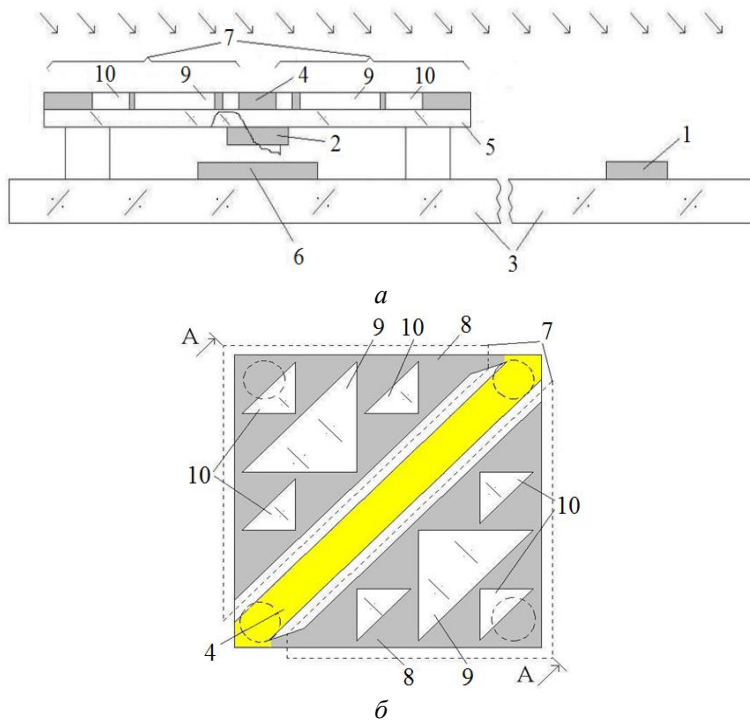


Рис. Болومترический детектор:

*a* – вертикальный разрез, *б* – вид сверху:

- 1 – первая болометрическая пленка, 2 – вторая болометрическая пленка,
- 3 – подложка, 4 – металлическая пленка, 5 – диэлектрическая пленка,
- 6 – светоотражающая пленка, 7 – открытая резонансная структура,
- 8 – проводящие структуры, 9 и 10 – первые и вторые центральные самоподобные элементы треугольной формы соответственно

Работает устройство следующим образом. В исходном состоянии все элементы фотодетектора находятся при температуре окружающей среды и поэтому электрические сопротивления первой 1 и второй 2 болометрических пленок будут одинаковыми. Затем входное информационное ИК излучение широкого спектрального диапазона поступает на вход устройства, т.е. на первую 1, вторую 2 болометрические пленки и окружающие их элементы

устройства. Т.к. первая болометрическая пленка 1 расположена на подложке 3 и термически с ней связана, то входное ИК информационное излучение не изменит их температуру ввиду значительной общей массы этих термически связанных элементов. Металлическая пленка 4 нагревается поглощенным ею ИК излучением, а часть прошедшего через неё излучения поглощается второй болометрической пленкой 2 и нагревает её. Геометрические размеры этих элементов определяют длины волн поглощаемого и преобразуемого ими коротковолнового ИК диапазона. Длинноволновая часть входного ИК излучения взаимодействует с открытой резонансной структурой 7, вызывая появление переменных напряжений и тем самым токов соответствующих частот в проводящих структурах 8. Т. к. металлическая пленка 4 является нагрузкой открытой резонансной структуры 7, то она также ещё нагревается и электрическим током. Причем с открытой резонансной структурой 7 эффективно взаимодействует электромагнитное ИК излучение как с длинами волн, кратными геометрическим размерам проводящих структур 8, так и с длинами волн, кратными размерам первых 9 и вторых 10 центральных самоподобных элементов треугольной формы, а также их общим периметрам. Та же часть входного коротковолнового ИК излучения, которая прошла сквозь металлическую пленку 4 и вторую болометрическую пленку 2, отражается от светоотражающей пленки 6 и возвращается для повторного поглощения и аналогичного преобразования.

Таким образом, болометрическая пленка 2 нагревается как за счет поглощения коротковолновой части входного информационного ИК излучения, так и электрическим током, полученным за счет преобразования длинноволновой части этого излучения. Сравнивая электрические сопротивления первой 1 и второй 2 болометрических пленок получают информацию об интенсивности входного информационного ИК излучения широкого спектрального диапазона.

В связи с тем, что в данном устройстве размеры всех элементов значительно меньше, чем длины волн преобразуемого ИК электромагнитного излучения, то общий размер его уменьшается. Показано, что уменьшение габаритов позволяет при создании на его основе матричного ИК приемника повысить пространственное разрешение в 1,5 раза при одновременном увеличении быстродействия. Размеры, а, следовательно, и теплоемкость металлической пленки 4 и второй болометрической пленки 2, задают время нагревания и охлаждения.

Такие матрицы могут стать основой изображающих радиометров для наземных и космических астрономических комплексов, систем безопасности (обнаружение скрытого оружия, взрывчатки и др. под одеждой), медицинской диагностики, контроля окружающей среды и различной продукции.

## Литература

1. Роках, А. Г. Сублимированные фотопроводящие пленки типа CdS: история и современность / А. Г. Роках // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2015. – № 2. – С. 59–65.
2. Фотодетектор: патент Республики Беларусь № 16608 / А. К. Есман, Г. Л. Зыков // Официальный бюллетень. – 2012. – № 6. – С. 141.
3. Есман, А. К. Приемник субмиллиметрового диапазона длин волн на искусственных материалах / А. К. Есман, Г. Л. Зыков, В. А. Потачиц // Приборы и техника измерений. – 2015. - № 1(10). – С. 5–9.
4. Есман, А. К. Селективный приемник терагерцового излучения / А. К. Есман, Г. Л. Зыков, В. А. Потачиц // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4. – С. 10–13.

УДК 37.01:378.4 (476)

### **Использование компьютерных технологий для контроля знаний студентов при выполнении физического практикума в рамках работы совместного факультета ТИПСЭАД-БНТУ**

Юркевич Н. П.<sup>1</sup>, Савчук Г. К.<sup>1</sup>, Ахмедов А. П.<sup>2</sup>, Мирсаатов Р. М.<sup>2</sup>,  
Темирова М. А.<sup>2</sup>, Худойберганов С. Б.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Ташкентский институт по проектированию, строительству  
и эксплуатации автомобильных дорог  
Ташкент, Республика Узбекистан

*В работе рассмотрены вопросы организации тестового контроля знаний при обучении студентов курсу общей физики. Показана необходимость разработки тестовой базы данных при проведении лабораторного физического практикума. Разработаны варианты вопросов и задач для эффективной реализации контроля знаний студентов технического вуза.*

При организации учебного процесса по образовательной программе в рамках работы совместного факультета ТИПСЭАД-БНТУ необходимо учитывать, что изучение каждой дисциплины проходит в сжатые сроки, в рамках которых следует обеспечить выполнение учебной программы и учебных планов данной специальности. Особенностью такой организации учебного процесса является высокая интенсивность информационной составляющей и, соответственно, нагрузок на студентов при выполнении всех видов занятий по данной дисциплине [1].

В курсе физики студентам необходимо освоить теоретический объем

знаний, преподаваемый на лекционных занятиях, приобрести навыки решения задач и получить необходимые компетенции на практических занятиях и при выполнении лабораторного физического практикума [2-3]. В таком динамичном режиме работы важным является вопрос об организации и методах контроля текущих знаний студентов, проверки степени усвояемости и восприятия дисциплины, формирования у студентов понятийной базы.

Современные компьютерные технологии и обеспеченность учебного процесса необходимым оборудованием позволяют использовать различные методы тестирования для текущего контроля знаний студентов. Данные методы можно внедрять при выполнении всех видов работ по дисциплине «Физика», но особенно это актуально в лабораторном физическом практикуме, когда студентам предлагается изучить трудоемкий для понимания вопрос, содержащий сложные математические выводы [3], структурированную понятийную базу конкретного раздела физики, сложные физические процессы и их связь со структурой вещества [4]. Разработка систем тестирования – сложная и трудоемкая задача, требующая создания базы данных [5], охватывающей как теоретические сведения, так и задачи, позволяющие актуализировать полученные студентом знания.

Целью данной работы являлся анализ интерактивных сред и компьютерных программ для тестирования, разработка базы данных для контроля знаний и умений в тестовом режиме при проведении лабораторного физического практикума по разделу «Механика. Статистическая и молекулярная физика. Термодинамика».

В настоящее время разработано большое количество интерактивных сред для создания баз данных тестовых задач. Они различаются как функционально, так и по своим свойствам генерации тестов. Одной из наиболее известных сред является «Универсальный тестовый комплекс» (разработчик оболочки комплекса Агранович С., e-mail: agran@pisem.net). Данная среда позволяет успешно создавать собственные базы задач и теоретических вопросов, выполнять разбивку материала на темы.

Для разработки тестов по дисциплине «Физика» особенно важным является то, что тексты, содержащие множество формул и графических объектов, легко интегрируются в данную среду с высоким качеством отображения на экране. В данной среде (рис. 1) базы данных легко редактируются: можно вносить изменения, дополнения, вставлять новые рисунки и т.д. Существует возможность определять интервал времени для тестирования, а также создавать большую вариативность возможных ответов.

Для работы совместного факультета преподавателями кафедры «Физика» Белорусского национального технического университета и кафедры «Естественные науки» Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог предлагается внедрение в

учебный процесс комплекса тестов по следующим темам: «Определение скорости распространения звуковых волн в твердых телах и модуля Юнга методом резонанса», «Определение отношения теплоемкостей  $c_p/c_v$  для воздуха методом адиабатического расширения», «Изучение законов сохранения в механике», «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса и методом капиллярного вискозиметра», «Исследование зависимости момента инерции от массы тела и ее распределения относительно оси вращения», «Изучение основных молекулярно-кинетических характеристик газа», «Изучение законов упругой деформации растяжения-сжатия», «Исследование затухающих колебаний физического маятника» (рис. 1).

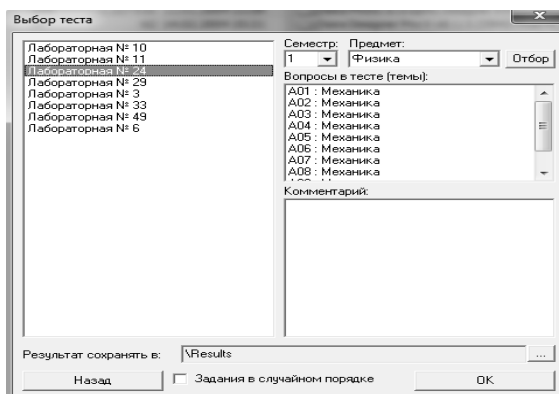


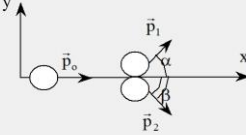
Рис. 1. База данных для тестирования по разделу «Механика. Статистическая и молекулярная физика. Термодинамика»

Для анализа результатов тестирования каждого студента программой формируется файл, в котором отражаются персональные данные студента и результаты его теста по количеству правильных и неправильных ответов, а также оценка, полученная за тест. Анализ таких данных важен как для преподавателя, так и для студента. Осмысливая результаты тестирования, студент видит свои пробелы в знаниях. Преподаватель в тоже время имеет возможность целенаправленно сфокусировать внимание и дать рекомендации обучаемому по тем вопросам темы, которые студенту не удалось до конца уяснить. Организация тестирования – это возможность одновременного опроса большого числа студентов за короткое время, что является важным при организации лабораторного физического практикума при подготовке специалистов в рамках работы совместного факультета ТИПСЭАД-БНТУ.

Для проведения тестирования выбран вариант разработки тестов как из вопросов теоретического материала, так и задач по данной тематике (рис. 2, 3).

**Вопрос 2**

Снаряд летит и разрывается на два осколка с импульсами направленными так, как показано на рисунке.



В проекциях на оси OX и OY закон сохранения импульса для данной ситуации будет записан как:

1) OX: $p_0 = p_1 \cos \alpha - p_2 \cos \beta$ ,	2) OX: $p_0 = p_1 + p_2$ ,
OY: $0 = p_1 \sin \alpha - p_2 \sin \beta$ ;	OY: $p_0 = p_1 - p_2$ ;
3) OX: $p_0 = p_1 \cos \alpha + p_2 \cos \beta$ ,	4) OX: $p_0 = p_1 \cos \alpha + p_2 \cos \beta$ ,
OY: $0 = p_1 \sin \alpha - p_2 \sin \beta$ ;	OY: $0 = p_2 \sin \alpha - p_1 \sin \beta$ ;

Рис. 2. Вид практического задания

**Вопрос 3.**

Что называется интерференцией?

- 1) Интерференцией волн называется явление наложения когерентных волн, распространяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в результате чего получаются фигуры Лиссажу.
- 2) Интерференцией волн называется явление наложения когерентных волн одного направления, в результате чего возникает стоячая волна.
- 3) Интерференцией волн называется суммирование колебаний двух любых волн, в результате чего происходит перераспределение энергии в различных точках пространства.
- 4) Интерференцией волн называется явление наложения когерентных волн, при котором происходит устойчивое во времени их взаимное усиление в одних точках пространства и ослабление в других в зависимости от соотношения между фазами этих волн.

Рис. 3. Вид теоретического задания

Тест в количестве десяти заданий должен быть выполнен студентом в течение фиксированного времени (десять минут). В конце теста на экран компьютера выводится количество правильных ответов в виде диаграммы и оценка по десятибалльной шкале. Необходимо отметить, что ни на каком этапе тестирования студент не имеет возможности внести изменения в текст теста или в его результат.

Особенностью данных тестов является то, что повторный тест необходимо проводить по истечении некоторого промежутка времени, дабы исключить возможность запоминания правильных ответов, и дать студенту время для основательного изучения темы лабораторной работы.

Таким образом, использование тестов для контроля знаний студентов инженерно-технического профиля при выполнении лабораторного физического практикума не только способствует адекватному проведению количественной оценки знаний и умений студента, но и позволяет студентам самостоятельно качественно наращивать понятийную базу по изучаемой теме. В совокупности с другими формами контроля это дает возможность преподавателю обеспечить обратную связь со студентом и определить индивидуальные задания для его самостоятельной работы.

### Литература

1. Кужир, П. Г. Совершенствование обучения студентов фундаментальным дисциплинам / П. Г. Кужир, Н. П. Юркевич, С. А. Постанкевич // *Высшая школа*. – 2002. – № 3. – С. 30–32.
2. Юркевич, Н. П. Исследование упругих свойств древесины при выполнении лабораторного физического практикума в курсе общей физики / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук // *Физическое образование в вузах*. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 96–101.
3. Sauchuk, G. K., Yurkevich N. P. The teaching of students of the construction engineering specializations using the modern computational structural crystallography / G. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich // *Scientific Light*. – 2018. – VOL 1, No 19. – P. 15–20.
4. Юркевич, Н. П. Ближний порядок и структурные перестройки в расплавах системы Al-Si / Н. П. Юркевич // *Неорганические материалы*. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 243–246.
5. Беланов, А. С. Компьютерные тесты по курсу общей физики и их роль в улучшении знаний студентов / А. С. Беланов, Д. О. Жуков, А. П. Мацнев // *Физическое образование в вузах*. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 47–57.



## **Компьютерное приложение для изучения микродеформаций и микронапряжений в твердых телах по дифракционным пикам**

Юркевич Н. П., Савчук Г. К.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В работе представлена разработка компьютерной программы для анализа наличия микронапряжений и областей когерентного рассеяния в образцах твердых тел по дифракционным пикам. Данное приложение используется при проведении лабораторного физического практикума для студентов инженерно-технического профиля.*

Целью работы являлась разработка компьютерного приложения для анализа дифракционных пиков образцов твердых тел с различной степенью микродеформаций и микронапряжений для лабораторного физического практикума ВТУЗов.

Решаемая задача является актуальной, так как не только повышает эффективность обучения студентов методу рентгеноструктурного анализа [1, 2] в теоретической части, но и позволяет приобрести практические навыки научного анализа особенностей микроструктуры конкретных образцов твердых тел в зависимости от условий получения. В совокупности с проводимыми практическими занятиями по решению задач раздела «Кристаллическое состояние» дисциплины «Физика» студенты смогут приобрести знания и умения, предусмотренные учебной программой, а также овладеть методами физического моделирования технических процессов и методами анализа при решении прикладных технических задач.

Структура разработанного приложения представлена на рис. 1. Для выполнения работы по анализу наличия в образцах твердого тела микронапряжений и областей когерентного рассеяния для студентов сформулированы задания, которые отражены на главной панели приложения.

В соответствии с заданием 1 студентам необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом методических указаний [3], дать ответы на контрольные вопросы. Все это необходимо, чтобы сформировать у студентов теоретическую базу для дальнейшего выполнения лабораторной работы.

В задании 2 предлагается вывести поочередно на экран дифракционные пики образцов, полученных с использованием высоких давлений: 1,5 ГПа, 2,5 ГПа и 3,0 ГПа, для различных кристаллографических плоскостей. Исходные данные по дифракционным пикам содержатся в отдельных файлах в

цифровом виде. Для вывода на экран пиков на главной панели приложения предусмотрены соответствующие кнопки, при нажатии на которые в графическом окне появляется дифракционный пик выбранного образца. На осях графика отображаются данные по величинам интенсивностей пиков и диапазону углов, в котором они сняты. Подвижная маркерная линия дает возможность определять углы, соответствующие положению максимумов пиков, а также значение углов на их полуширине, которые необходимы для проведения дальнейших расчетов. Для этого предусмотрено перемещение маркерной линии при помощи нажатия клавиши мыши.

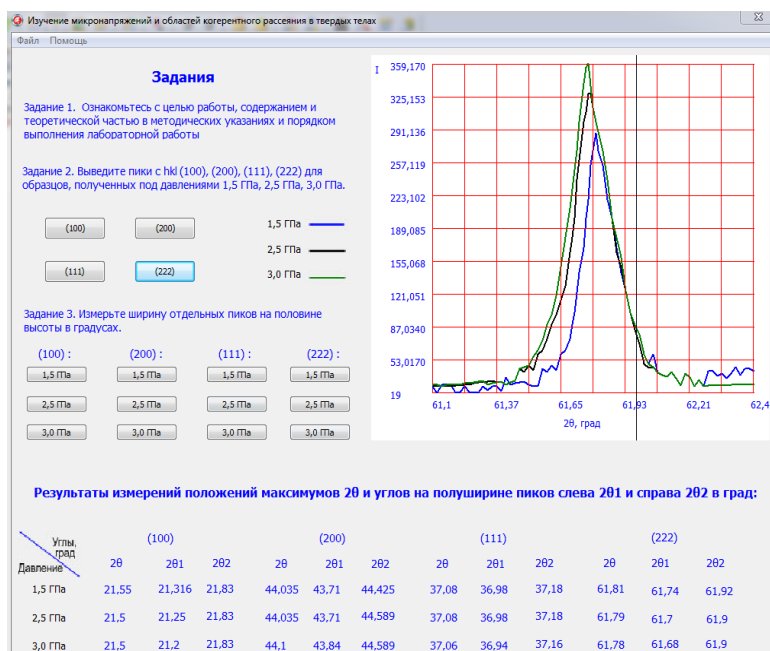


Рис. 1. Структура компьютерного приложения для анализа дифракционных пиков образцов твердых

В задании 3 для дифракционных пиков каждого изучаемого образца непосредственно определяются углы, соответствующие максимумам пиков, а также углы на полуширине пиков. На рис. 2. показан пик от кристаллографических плоскостей с индексами Миллера (222) для образца, полученного под давлением 3,0 ГПа. Наведением маркерной линии на точку пересечения горизонтальной линии, проведенной на полувысоте, и линии дифракционного

пика определяется соответствующий угол. На полувысоте требуется определить два дифракционных угла. Положение маркерной линии на рис. 2 соответствует правому углу на полувысоте дифракционного пика.

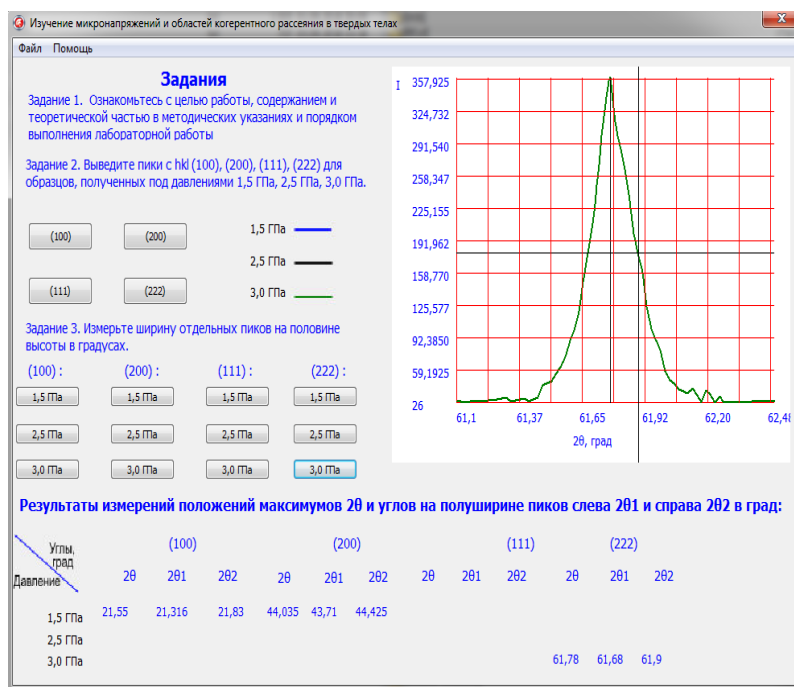


Рис. 2. Дифракционный пик для образца, полученного под давлением 3,0 ГПа

При этом данные о величинах углов выводятся в динамическом режиме в виде таблицы и удобны для дальнейшего анализа в рамках поставленных перед студентами задач по определению наличия микродеформаций и областей когерентного рассеяния в изучаемых образцах.

Данные, снятые при анализе дифракционных пиков, которые получены от различных кристаллографических плоскостей, позволяют студентам вычислить размеры областей когерентного рассеяния и определить значения микродеформаций в твердом теле. Впоследствии проанализировать влияние используемого высокого давления на формирование микроструктуры образцов.

Приложение содержит подробную инструкцию по применению с указанием требований и технических параметров используемой системы.

Разработка компьютерных приложений является важным инновационным элементом при организации учебного процесса по дисциплине «Физика» [4, 5], так они наглядно позволяют изучать сложные физические процессы, которые студентам трудно воспринимать в текстовом формате.

Данное приложение разработано на кафедре «Физика» БНТУ. Использование приложения показало высокую эффективность при изучении студентами инженерно-технических специальностей структуры и свойств твердых тел в зависимости от условий их получения.

### Литература

1. Sauchuk, G. K., Yurkevich N. P. The teaching of students of the construction engineering specializations using the modern computational structural crystallography / G. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich // *Scientific Light*. – 2018. – Vol. 1, № 19. – P.15–20.

2. Савчук, Г. К. Исследование микродеформаций и областей когерентного рассеяния в твердых телах в лабораторном физическом практикуме / Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич // *Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы X Юбилейной Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Мозырь, 27-30 мар. 2018 г. / Мозырский гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина*. – Мозырь, 2018. – С. 69–71.

3. Есман, А. К. Использование рентгенографического метода для определения микронапряжений и областей когерентного рассеяния. [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе по физике для инженерно-технических специальностей / Бел. нац. техн. ун-т; сост. А. К. Есман, Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич, Г. Л. Зыков. – *Электрон. дан.* – Минск: БНТУ, 2018. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/48430>.

4. Юркевич, Н. П. Использование инновационных технологий в лабораторном физическом практикуме при обучении студентов инженерно-строительного профиля / Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич // *Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы VIII Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Мозырь, 22-25 мар. 2016 г. / Мозырский гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина*. – Мозырь, 2016. – С. 59–61.

5. Юркевич, Н. П. Исследование распределения магнитного поля в многослойном соленоиде конечной длины / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, П. Г. Кужир // *Физическое образование в вузах*. – 2015. – Т.21, № 2. – С. 49–60.

**Расчеты параметров оптических изображений объектов, полученных с помощью датчиков импульсных магнитных полей**

Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основании разработанных методов контроля получены расчетные зависимости  $U(x)$  электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН) от расстояния  $x$  до проекции оси линейного индуктора. Найденные зависимости  $U(x)$  для алюминиевого образца в виде клина позволяют повысить оперативность контроля толщины по длине образца, а также дефектов сплошности в нем.*

Распространенными методами контроля электрических свойств объектов из электропроводящих материалов и дефектов сплошности в них являются вихретоковый [1], магнитодинамический [2]. Теоретические и экспериментальные результаты исследований свойств электропроводящих объектов с использованием гистерезисных свойств преобразователей магнитного поля, проведенные авторами, изложены в [3-5]. Целью работы является повышение оперативности контроля определения толщины электропроводящих объектов, дефектов сплошности в них за счет анализа сигнала с удаленных от индуктора участков объекта. Это достигается путем проведения теоретических расчетов распределений электрического напряжения  $U(x)$  от координаты  $x$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН). Для расчетов использовали формулы, полученные авторами ранее в [5] для МН с арктангенсовой характеристикой ветвей гистерезиса. На объект с прижатым к нему МН воздействовали импульсом магнитного поля с заданными амплитудой и временем нарастания, и рассчитывали величину электрического напряжения  $U$  на выходе магнитной головки, сканирующей МН. Импульсное магнитное поле создавали с помощью линейного индуктора. Тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля индуктора рассчитывали по формуле:

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная;  $x$  – расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения;  $b$  – расстояние в сантиметрах от оси индуктора до магнитного носителя.

Величину  $U$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля в прямом направлении  $H_1$ , определяли по формуле

$$U_1 = 23,5 + 24,3 \operatorname{arctg}(0,011H_1 - 1,45), \quad (2)$$

а величину электрического напряжения при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля  $H_1$  в прямом направлении и вторым обратным импульсом  $H_2$  находили как

$$U_2 = -23,5 + 0,61U_1 + (24,5 + 0,40U_1)\operatorname{arctg}((0,011 + 0,000087U_1)H_2 + 1,45 - 0,0016U_1). \quad (3)$$

При использовании метода нулевого центрального максимума получали максимальную чувствительность только в точке, лежащей на проекции оси индуктора. Найдем чувствительность метода в других точках распределения  $U(x)$ . Пусть толщина образца из алюминия изменяется вдоль координаты  $x$  по формуле:  $d = d_0(1+0,2x)$ , а  $d_0 = 0,1$  мм.

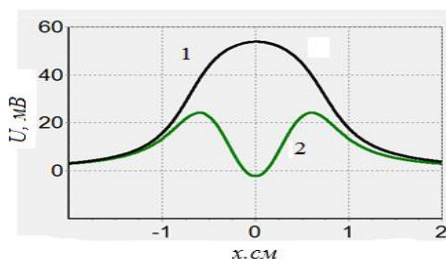


Рис. 1. Расчетные зависимости  $U(x)$ :  
1 – воздействие прямым импульсом, 2 – воздействие прямым и обратным импульсами. Толщина пластины  $d = d_0$

Тогда согласно [3] при времени нарастания импульса порядка  $t_{max} = 2,0 \cdot 10^{-5}$  с получаем следующую зависимость величины тангенциальной составляющей напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности пластины:

$$H = H_0 (1 + 0,04x). \quad (4)$$

При  $x = 1$  см, получаем  $d = 1,2d_0$  [3]. Воздействуем на пластину из алюминия импульсом магнитного поля линейного индуктора в прямом направлении. В результате получаем зависимость 1 (рис. 1) величины  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего МН от расстояния  $x$  до оси проекции индуктора на МН. После этого воздействуем импульсом магнитного поля обратного направления и получаем зависимость 2 (рис. 1)  $U(x)$ .

Характеристики магнитного носителя указаны в [5, рис. 1]. Расчет напряженности магнитного поля осуществляли по (1). При этом для прямого и обратного импульсов значения постоянных составляли  $A_{11} = 144 \text{ А}\cdot\text{см}$ ,  $A_{21} = -35,8 \text{ А}\cdot\text{см}$ . Метод нулевого максимума второго порядка состоял в следующем. Задавали величину амплитуды прямого и обратного импульсов магнитного поля таким образом, чтобы в результате воздействия обоими импульсами на МН при  $x = 0$  величина  $U(x) = 0$  для образца заданной толщины. Из рис. 1 видно, что минимум сигнала для зависимости 2 находится вблизи нуля (на проекции оси) для толщины алюминиевой пластины  $d_0$ . Определим согласно зависимостям  $U(d)$ , представленным в [3], для алюминиевой пластины толщиной  $d$ , что увеличение ее толщины в 1,2 раза (например, от 0,1 мм до 0,12 мм при времени нарастания импульса порядка  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ) соответствует увеличению напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности пластины в 1,04 раза.

Таким образом, находим параметры импульсов магнитного поля для расчета  $A_{21} = 149,76 \text{ А}\cdot\text{см}$ ,  $A_{22} = -37,23 \text{ А}\cdot\text{см}$ . Воздействуем указанными импульсами на образец и получаем зависимость 2 (рис. 2). Здесь же представлена зависимость 1 из рис.1, а также разностная зависимость 3 между распределениями 1 и 2. На основании этих распределений 1 и 2, построим оптические изображения магнитных полей. Это построение осуществляем путем создания зеркальных функций, наложения прямых и зеркальных зависимостей друг на друга, со смещением зеркальных функций по вертикали и выделением полученных геометрических фигур с установлением уровней оттенков цветности для них (рис. 3).

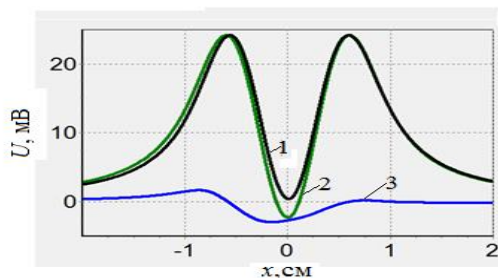


Рис. 2. Расчетные зависимости  $U(x)$ :  
1 – при  $d = d_0$ , 2 – при  $d = 1,2d_0$ , 3 – разностная зависимость

Найдем распределение  $U(x)$  для алюминиевой пластины в виде клина с линейно изменяющейся вдоль координаты  $x$  толщиной  $d = d_0(1 + 0,2x)$ . Для уменьшения погрешности измерений найдем более точные параметры

нулевого максимума:  $A_{21} = 144,86 \text{ А}\cdot\text{см}$ ,  $A_{22} = -36,015 \text{ А}\cdot\text{см}$ . Применим метод нулевого центрального максимума и получим расчетные распределения  $U(x)$  для толщины алюминиевой пластины 1,0 мм и 1,2 мм.

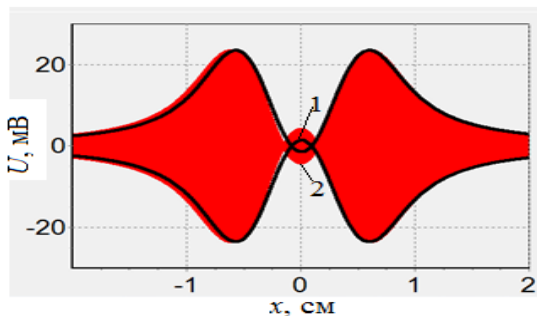


Рис. 3. Оптические изображения магнитных полей:  
1 – при  $d = d_0$ , 2 – при  $d = 1,2d_0$

Из рис. 4 следует, что величина сигнала увеличилась на 2,7 мВ, а величина разностного сигнала при  $x = 1 \text{ см}$  составляет 0,9 мВ.

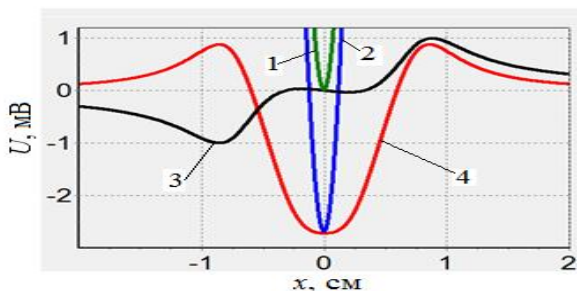


Рис. 4. Расчетные зависимости  $U(x)$ : 1 – при  $d=d_0$ , 2 – при  $d=1,2d_0$ ,  
3 – разностная зависимостей для  $d = d_0(1+0,2x)$  и  $d = d_0$ ,  
4 – разностная зависимостей для  $d = 1,2d_0$  и  $d = d_0$

При этом информацию о свойствах объекта получаем в результате одного измерения по всей линии замера приблизительно в 10 раз быстрее, чем при многочисленных измерениях (например, 30 измерений от  $-1,5 \text{ см}$  до  $1,5 \text{ см}$  с локальностью  $0,1 \text{ см}$ ), с точностью того же порядка.

Разработанный метод позволяет повысить в десятки раз оперативность определения дефектов и геометрических параметров при контроле сварных трубопроводов и строительных металлических конструкций.



## Литература

1. Астахов, В. И. К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом / В. И. Астахов, Э. М. Данилина, Ю. К. Ершов // Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 39–49.
2. Лухвич, А. А. Толщинометрия покрытий на деталях сложной геометрии / А. А. Лухвич, А. Л. Лукьянов, Я. И. Шукевич, А. К. Шукевич, М. Н. Полякова, В. В. Мосякин // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 13.
3. Павлюченко, В. В. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.
4. Pavlyuchenko, V. V. Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich and V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 121–127.
5. Павлюченко В. В. Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. 2020. – №1. – С. 51–60.

УДК 620.130-179

### **Контроль электропроводящих объектов с использованием гистерезисных свойств преобразователей магнитного поля**

Дорошевич Е. С., Павлюченко В. В.  
Белорусский Национальный Технический Университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены оптические изображения распределений магнитных полей по координате, соответствующие параметрам суммарного магнитного поля вблизи поверхности объекта и характеризующие электрические свойства материала объекта и дефекта сплошности в нем. При этом задавали оптимальные последовательности изменения амплитуды напряженности магнитного поля для построения дискретных оптических изображений.*

Контроль свойств объектов может быть осуществлен вихретоковым [1] и другими методами. Определение удельной электропроводности объектов, а также их толщины и параметров дефектов в них осуществлено в работах авторов в импульсных магнитных полях с применением разработанных гистерезисных методов контроля [2-5]. Целью работы является повышение точности контроля свойств электропроводящих объектов в импульсном магнитном поле путем штрих-кодовых форм записи, считывания и расшифровки информации об изделиях. Для этого используют магнитный носитель (МН)

с прямоугольной петлей гистерезиса. Определяют количество последовательных разнополярных импульсов магнитного поля, их амплитуды и длительности.

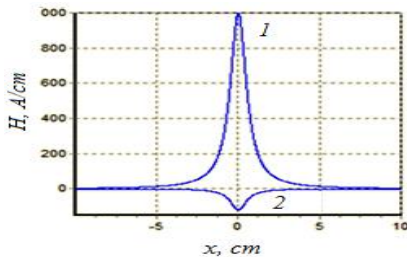


Рис. 1. Зависимость напряженности магнитного поля  $H_i(x)$

Воздействуют на МН с контролируемым объектом указанными импульсами, после чего сканируют магнитный носитель индукционной магнитной головкой (МГ), получают осциллограммы  $U(t)$  электрического напряжения МГ, которые преобразуют в распределения  $U(x)$ , где  $x$ —пространственная координата, а затем в штрих-кодовые изображения и сравнивают с эталонными изображениями объектов. Рассчитывают величину тангенциальной составляющей напряженности  $H_t$  магнитного поля по линии замера, перпендикулярной оси линейного индуктора, в направлении  $x$  от проекции его оси по формуле:

$$H_1 = A / (x^2 + C^2), \quad (1)$$

где  $A$  — постоянная;  $C$  — расстояние от оси индуктора до МН. Здесь  $x$  измеряется в см, а  $H_1$  — в А/см. На рис. 1 показаны зависимости величины  $H_t(x)$  до проекции оси линейного излучателя для импульса в прямом направлении магнитного поля 1 и в обратном 2.

Пусть величина  $U$ , для положительных прямоугольных участков  $U = U(x)$  равна  $U = 30$  мВ, отрицательных  $U = -30$  мВ, а изменение амплитуды напряженности импульсов магнитного поля осуществляется в соответствии с последовательностью 1024, ...32, 16, 8 А/см при расстоянии от оси излучателя до МН 0,6 см. Если число импульсов равно 9, то амплитуда импульсов электрического напряжения  $u_i$  будет изменяться следующим образом:  $u_1 = 30$ ,  $u_2 = u_1 - 2 \cdot 30$ ,  $u_3 = u_2 + 2 \cdot 30$ ,  $u_9 = u_8 + 2 \cdot 30$ . На рис. 2 изображена зависимость  $U$ , снимаемого с МГ, сканирующей МН от расстояния  $x$  до проекции оси линейного излучателя при указанном ограничении сигнала.

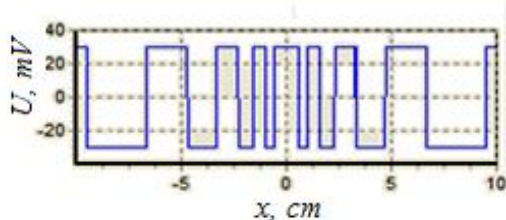


Рис. 2. Зависимость напряжения  $U(x)$

Это распределение характеризуется координатами начала  $x_i$  и конца  $x_j$  каждого прямоугольного участка, его длиной  $a_i$  и расстоянием между соседними участками  $b_i$ . По указанным параметрам можно измерять напряженность магнитного поля и находить ее распределения по координате  $x$ . Оптические изображения полей формируют путем яркостного и цветового выделения прямоугольных участков, как это показано на рис. 3, ставя им в соответствие оттенки уровня цветности, которые позволяют оперативно обрабатывать информацию в автоматическом режиме путем сравнения с эталонными изображениями с проведением операций вычисления и формирования разностных оптических изображений.

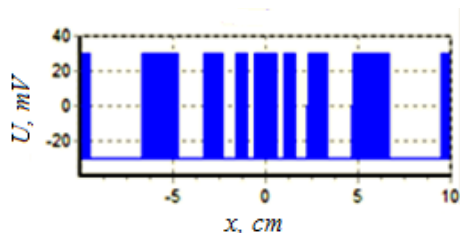


Рис. 3. Оптическое изображение распределения  $U$

Теперь воздействуем на МН с объектом поочередно импульсами магнитного поля в прямом направлении 1, 3, 5, 7, 9 и в обратном 2, 4, 6, 8, (рис. 4) и получаем распределение  $U_1 = U_1(x)$  на рис. 5.

Если на локальных участках  $0,6 \text{ см} < x < 0,7 \text{ см}$  и  $-0,7 \text{ см} < x < -0,6 \text{ см}$  имеются локальные неоднородности объекта, то получают распределение  $U_2 = U_2(x)$ , отличающееся от указанного только залитыми полосами на этих участках (рис. 5). При этом может быть применен МН не только с прямоугольной петлей гистерезиса.

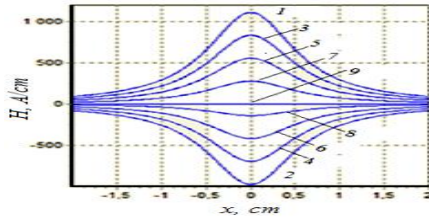


Рис. 4. Зависимость напряженности магнитного поля  $H_A(x)$

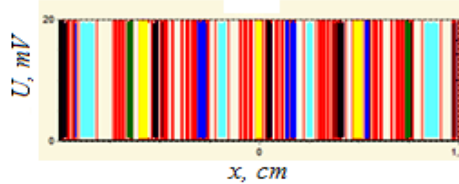


Рис. 5. Зависимость напряжения  $U$

На рис. 6 показано штрих-кодовое распределение зависимости  $U(x)$ , полученное в результате наложения нескольких распределений импульсных магнитных полей.

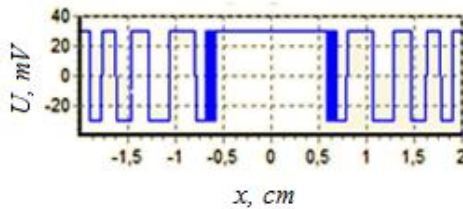


Рис. 6. Штрих-кодовое оптическое распределение  $U$

Разработанные авторами полные штрих-кодовые распределения  $U(x)$ , соответствующие распределениям магнитных полей, имеют более сложную структуру и несут в себе массу дополнительной полезной информации. Параметры штрих-кодовых линий (ширина и координаты) характеризуют изменение величины напряженности магнитного поля и, следовательно, параметры неоднородностей объекта.

Полученные распределения могут быть считаны и проанализированы путем использования разработанных методов автоматической обработки штрих-кодовых оптических распределений.

Метод может быть использован при контроле трубопроводов, строительных и других конструкций из ферромагнитных, парамагнитных и диамагнитных металлов.

### Литература

1. Атавин, В. Г. Отстройка от электропроводности основания при изменении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов / В. Г. Атавин, А. А. Узких, Р. Р. Исхужин // Дефектоскопия. – 2018. – № 1. – С. 58–64.
2. Павлюченко, В. В. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.
3. Pavlyuchenko, V. V., Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, and V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, No. 1. – P. 8–16.
4. Павлюченко, В. В. Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 56–63.
5. Pavlyuchenko, V. V. Testing for Discontinuities in Metals Using Film Flux Detectors / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, No. 1. – P. 48–58.

УДК 512.64

### Использование блочно-модульной системы в преподавании основ физической теории

Бибик А. И., Журавкевич Е. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Работа посвящена использованию блочно-модульной образовательной системы как основы повышения эффективности высшего профессионального образования. Рассмотрены вопросы адаптации данной методики к преподаванию курса физики для инженерно-технических специальностей на примере раздела "Механика".*

В современных условиях непрерывного возрастания конкуренции между мировыми экономическими системами как никогда ощущается необходимость в высококвалифицированных кадрах. Источником таких кадров в первую очередь являются высшие учебные заведения. Современный

педагогический процесс обязан быть личностно ориентированным, развивающим, мотивирующим, учитывающим реальные способности и особенности каждого студента. В связи с этим особенное внимание необходимо уделять внедрению новых педагогических технологий, одной из которых и является блочно-модульное обучение.

Модульное обучение зародилось в конце Второй мировой войны в условиях необходимости обучения профессиональным умениям в короткие сроки. Толчком к массовому внедрению модульных технологий послужила конференция ЮНЕСКО, прошедшая в Париже в 1974 г., где рекомендовалось "... создание открытых и гибких структур образования и профессионального обучения, позволяющих приспособляться к изменяющимся потребностям производства, науки, адаптироваться к местным условиям [1].

Сущность модульного обучения состоит в более или менее самостоятельной работе обучаемого по предложенной ему *индивидуальной* учебной программе, включающей целевой план действий, необходимый объем информации и методическое руководство по достижению поставленных целей. Модуль, выступающий основным средством модульного обучения, с одной стороны является составной частью блока (результата освоения некоторого раздела учебной дисциплины), а с другой - сам состоит из отдельных базовых элементов, необходимых для понимания изучаемого материала. Рассмотрим данную структуру на примере такого раздела физики как "Механика". Результатом изучения данного раздела является возможность определения положения тела в пространстве в любой момент времени. Поскольку любое движения тела можно представить как совокупность его поступательного и вращательного движений, то для решения основной задачи механики необходимо изучить закономерности каждого из этих двух видов движения в отдельности. Таким образом, изучение раздела "Механика" сводится к изучению двух блоков знаний: "Поступательное движение тела" и "Вращательное движение тела". Каждый из этих блоков, в свою очередь, состоит из модулей "Кинематика", "Динамика", "Законы сохранения". Базовыми элементами, необходимыми для понимания данных модулей, являются математические операции дифференцирования, интегрирования, действия над векторами, а также определения основных физических понятий, имеющих отношение к механике, таких как координата, скорость, ускорение, сила, энергия.

Важный момент в разработке модуля - наглядное представление информации. Существует несколько моделей компоновки информации [2]. Для нас особый интерес представляют *логическая* и *фреймовая* модели. Примером логической модели служит символическая запись математических выражений, что значительно уменьшает объем визуально воспринимаемой информации. Фреймовая модель структурирует и систематизирует информацию в специальные таблицы, матрицы, схемы на основе *фрейма*. Фрейм (рамка) – это

единица представления знаний, детали которой могут быть изменены согласно текущей ситуации (например добавление новых элементов для периодической системы Менделеева или новых образцов технологических устройств для различных производственных циклов). Примером использования данных моделей в курсе "Механика" может служить сравнительный анализ закономерностей поступательного и вращательного движений, представленных в табл.

Таблица

Сравнение характеристик и закономерностей поступательного и вращательного движения

Поступательное движение	Вращательное движение
Положение тела в пространстве	
$r$ - радиус-вектор	$\varphi$ - угол поворота
Скорость изменения положения тела	
$v = \frac{dr}{dt}$ - линейная скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ - угловая скорость
Ускорение тела	
$a = \frac{dv}{dt}$ - линейное ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение
Инертность тела	
$m$ - масса	$I$ - момент инерции
$p = mv$ - импульс	$L = I\omega$ - момент импульса
$F$ - сила	$M$ - момент силы
$F = \frac{dp}{dt}$ - основное уравнение динамики поступательного движения (II закон Ньютона)	$M = \frac{dL}{dt}$ - основное уравнение динамики вращательного движения
$E_{ном} = \frac{mv^2}{2}$ - кинетическая энергия поступательного движения тела	$E_{вращ} = \frac{I\omega^2}{2}$ - кинетическая энергия вращательного движения тела
$\delta A = Fdr$ - работа силы	$\delta A = Md\varphi$ - работа силы

Гибкость такого представления обусловлена возможностью выбора набора элементов в зависимости от того, насколько углубленным предполагается изучение предмета для конкретных специальностей.

Теория модульного обучения базируется на таких принципах как динамичность, действенность, гибкость, разносторонность, паритетность [3].

Принцип *динамичности* состоит в умении быстрого изменения содержания учебных элементов, а также структуры модулей и блоков в зависимости от содержания социального заказа и содержания предметной области.

Принцип *действенности* требует наглядно и доступно показывать связь изучаемой дисциплины с конкретной профессиональной деятельностью обучаемых.

Принцип *гибкости* обязывает строить структуру модулей в соответствии с уровнем реальной подготовки обучаемых, который может быть выявлен в результате предварительной диагностики знаний и умений.

Принцип *разносторонности* обязывает предоставить обучаемому и преподавателю свободу выбора путей организации взаимодействия в процессе усвоения содержания модуля.

Принцип *паритетности* обязывает обучаемых самостоятельно освоить учебный материал до определенного уровня и освобождает преподавателя от выполнения чисто информационной функции, создавая условия для реализации функции консультационно-координирующей.

Таким образом, основными мотивами внедрения модульного обучения являются:

- гарантированность достижения результатов обучения;
- возможность выбора уровня обучения;
- возможность работы как в групповом, так и в индивидуальном темпе.

### Литература

1. Прокопенко, И. Модульная система повышения квалификации кадров низшего и среднего звена / И. Прокопенко // Проблемы труда. – 1985. – № 2 – С. 17–24.
2. Борисова, Н. В. От традиционного через модульное к дистанционному образованию: учеб. пособие / Н. В. Борисова. – Домодедово: ВИПК МВД России, 1999. – 174 с.
3. Юцявичене, П. А. Создание модульных программ / П. А. Юцявичене // Советская педагогика. – 1990. – № 2. – С. 55–60.

УДК 378.2

### **Формирование гибких навыков у студентов, изучающих физику**

Кужир П. Г.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрены некоторые аспекты формирования гибких навыков у студентов инженерного профиля при проведении занятий по физике.*

Бытует мнение, что успех специалиста зависит только от уровня его профессиональной подготовки. Безусловно, профессиональные компетенции



(их обычно называют «твердыми» навыками) важны. Но сегодня работодатель ищет кандидатов, обладающих не только профессиональными, но и гибкими навыками. Эти навыки ассоциируются с эмоциональным интеллектом, позволяющим специалисту эффективно решать вопросы как профессиональных, так и личностных, социальных ситуаций. Главными составляющими эмоционального интеллекта являются самосознание, самооценка, уверенность в себе, социальная чуткость, способность увлекать сотрудников перспективами, управление отношениями. Такие навыки включают много факторов: коммуникативность, лидерство, умение работать в команде, способность четко доносить идеи до сотрудников, управлять эмоциями и стрессами [1]. Перечень гибких навыков, не прописанных ни в каких инструкциях, значительно шире. Отметим, что эти навыки важны не только в работе, но и в жизни, причем, чем выше вы взбираетесь по карьерной лестнице, тем все большую роль наряду с профессиональными играют гибкие навыки. Объяснить данный факт можно тем, что чем выше занимаемый пост, тем больше глобальных проблем приходится решать руководителю, консультируясь с сотрудниками и подчиненными конкретным вопросам. Исследования, проведенные в Гарвардском и Стенфордском университетах свидетельствуют о том, что твердые навыки способствуют профессиональной успешности только на 15 %, а гибкие определяют оставшиеся 85 %. Поэтому руководство компаний стремится нанимать сотрудников с высоким уровнем развития гибких навыков. Конечно, это не значит, что профессиональные технические знания не нужны. Они важны, но для успешного развития карьеры их недостаточно.

Развивать гибкие навыки следует с ранних лет. Особенно важно продолжить их развитие в вузе. При проведении занятий по физике со студентами можно развивать гибкие навыки. Всякое занятие должно содержать воспитательные элементы, формирующие будущего специалиста. Подчеркнем, что усвоение основных элементов эмоционального интеллекта позволит в дальнейшем успешно продвигаться по карьерной лестнице, сделает работу и жизнь более интересной и продуктивной. Ведь в современном понимании хороший специалист – это публичный специалист. Если о профессионале никто не знает, и он ни с кем не контактирует, то польза от такого специалиста невелика.

Разберем на примере занятий по физике как можно развивать гибкие навыки у студентов. При проведении каждого занятия преподаватель четко формулирует цели и задачи, пути их реализации. Это формирует у студента понимание, что каждая задача преследует какую-то цель, учит анализировать ситуацию, находить пути решения и в дальнейшем использовать эти знания в работе. Важно научить студента не только тому, что у него хорошо получается, но и браться за новые проблемы. Этому способствует решение либо

в аудитории, либо дома качественных задач – оценок, которые учат выделять главное, анализировать явления, приобщают к самостоятельной творческой работе [2, 3]. Решение таких задач эффективно формирует развитие гибких навыков, так как задачи детально обсуждаются на занятиях. В дискуссиях, общении вырабатываются навыки работы в команде, умение убеждать, логически мыслить, признавать свои ошибки. Эти шаги развивают у студентов интерес к учебе, творчеству и убеждают его, что обучение – это неотъемлемый и необходимый процесс в жизни каждого человека, который хочет продвинуться по карьерной лестнице и стать лучшим профессионалом на своем месте.

В процессе обучения преподаватель должен научить студента учиться, работать самостоятельно, самосовершенствоваться, беречь и ценить время.

Ценным компонентом формирования гибких навыков является научная работа. Конечно, ждать выдающихся научных результатов от студентов младших курсов не приходится. Однако она развивает способность к анализу информации, к ее осмыслению и систематизации, расстановке приоритетов, формирует компетенции и навыки. При подготовке работы студент учится грамотно излагать свои мысли, выступать перед аудиторией, доходчиво доносить результаты своей работы до слушателей, отвечать на вопросы, спокойно воспринимать критику и отстаивать свои позиции.

Систематическая самостоятельная работа студента над учебными материалами также позволяет формировать гибкие навыки. Желательно, чтобы такая работа проходила под контролем преподавателя, который вносит свои коррективы.

Итак, формирование гибких навыков может быть с успехом реализовано на всех видах занятий по физике, что, несомненно, будет в дальнейшем хорошим стартом в овладении инженерно-техническими знаниями на старших курсах и способствовать успешной реализации в профессии.

### **Литература**

1. Шипилов, В. Перечень навыков soft-skills и способы их развития / В. Шипилов // Корпоративный менеджмент [Электронный ресурс]. – 1996–2018. – Режим доступа: [https://www.cfin.ru/management/people/dev\\_val/soft-skills.shtml](https://www.cfin.ru/management/people/dev_val/soft-skills.shtml). Дата доступа: 17.05.2016.
2. Общая физика: оптика, квантовая физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Сборник задач: учебное пособие / П. Г. Кужир, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук. – Минск: БНТУ, 2018. – 197 с.
3. Электричество и магнетизм. Сборник задач: учебное пособие / П. Г. Кужир, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 264 с.

## Применение капиллярного метода дефектоскопии для материалов с многослойными покрытиями

Попко С. В.<sup>1</sup>, Петренко С. И.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусская государственная академия авиации,  
Минск, Республика Беларусь

*В авиации и космонавтике существует настоятельная необходимость изготовления легких и износостойких конструкций. Анализ известных способов и технологических процессов, направленных на получение заданных эксплуатационных свойств, показывает, что решением задачи создания современных материалов является использование технологии производства и нанесения многокомпонентных и многослойных полимерных композитов.*

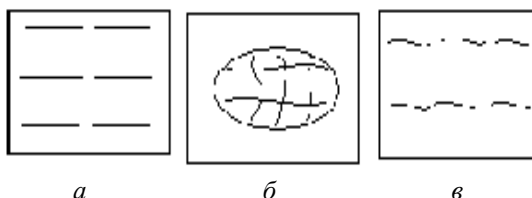


Рис. Образец из алюминия:

*а* – контрольный, *б* – покрытого полистиролом,  
*в* – покрытого полистиролом, легированным фуллереном C<sub>60</sub>

Целью данной работы являлась разработка метода неразрушающего контроля алюминия, а также алюминия с многослойным покрытием. Наиболее популярным и распространенным в мире в настоящее время является капиллярный метод, так как с его помощью можно обнаружить не только поверхностные и сквозные дефекты, но по их расположению, протяженности, форме и ориентации можно получить ценную информацию о характере дефекта и даже некоторых причинах его возникновения. Капиллярный контроль основан на проникновении под действием капиллярных сил индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных дефектов и регистрации следов, которые создает извлеченная из полостей дефектов индикаторная жидкость на контролируемой поверхности.

Поскольку конструкция самолета подвергается переменным по величине и знаку нагрузкам, изменяющимся циклически, то в ней возникают трещины,

возрастающие с большей или меньшей скоростью и приводящие к разрушению после определенного для каждого материала числа циклов. В работе приводятся данные о влиянии циклических напряжений ультразвуковой частоты на развитие наиболее опасных дефектов, т.е. трещин на поверхности алюминия, а также алюминия, покрытого полистиролом и алюминия, покрытого полистиролом, модифицированным фуллереном  $C_{60}$ . Структура полистирола плюс  $C_{60}$  была получена методом полива полистирола раствором  $C_{60}$  в толуоле. В результате эксперимента установлено, что наибольшее количество микротрещин (рис. а) возникает на поверхности чистого алюминия, которые затем перерастают в макротрещины. При том же количестве циклов ( $N = 2 \cdot 10^7$ ) озвучивания на поверхности алюминия, покрытого полистиролом, появляются дефекты, представляющие собой конгломерат близкий к цилиндрическим, овальным и другим несплошностям, сообщающимся и не сообщающимся между собой (рис. б).

На поверхности алюминия, покрытого полистиролом плюс  $C_{60}$  способом газотермического напыления, появляются более мелкие трещины, размером  $\sim 50$  мк (рис. в). Это говорит о том, что композиционное покрытие подавляет рост развивающихся трещин. Известно, что легирование полистирола фуллереном приводит к улучшению некоторых свойств этого материала: повышается твердость, модуль упругости. Для определения механических характеристик исследуемых материалов использовался прибор IMPULSE-1R. Исследуемый образец подвергается воздействию индентора, с помощью которого в результате одного измерения можно получить информацию о твердости, модуле упругости. Основой для расчета всех параметров является функция зависимости скорости проникновения индентора от времени, а умножив его на массу индентора получаем значение контактной силы  $P(t)$ , которая дает представление о твердости  $H$  материала:

$$H = \frac{1}{\pi D} \cdot \frac{\partial P}{\partial \alpha},$$

где  $D$  – диаметр сферы индентора;  $\alpha$  – глубина его внедрения.

Модуль Юнга  $E$  рассчитывается по формуле

$$E = 0,93 \frac{C}{\sqrt{R\alpha_{\max}}},$$

где  $C$  – коэффициент жёсткости;  $R$  – радиус сферического наконечника.

Результаты эксперимента показали, что легирование полимера углеродными наночастицами увеличивает модуль Юнга этих материалов в 1,5-2 раза в зависимости от объемной доли фуллеренов. В то же время легирование полистирола фуллереном  $C_{60}$  уменьшает поверхностную энергию  $\gamma$  со 140 мДж/м<sup>2</sup> до 125 мДж/м<sup>2</sup>. Поверхностную энергию определяли методом покоящейся капли. В качестве смачивающих жидкостей использовали

дистиллированную воду и глицерин. Поверхностная энергия влияет на многие физико-химические свойства материалов. В частности,  $\gamma$  входит в известное уравнение Гриффитса, согласно которому напряжение  $\sigma$ , при котором трещина достигает критических размеров, после чего наступает растрескивание, разрушение материала, определяется формулой

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}},$$

где  $l$  – длина половины трещины;  $E$  – модуль Юнга.

Поэтому для улучшения прочностных характеристик материалов желательно наносить многослойные покрытия, каждое из которых привносит свою лепту в улучшение того или иного свойства материала.

### Литература

1. Витязь, П. А. Наноструктуры в конденсированных средах : достижения и перспективы / П. А. Витязь, Э. М. Шпилевский // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. – Минск, 2018. – С. 3–8.
2. Капиллярный неразрушающий контроль / П. П. Прохоренко [и др.]. – Минск, 1998. – 160 с.
3. Рудницкий, В. А. Определение физико-механических параметров вязкоупругих материалов методом динамического вдавливания индентора / В. А. Рудницкий, А. П. Крень. // Достижения физики неразрушающего контроля. – Минск, 2003. – С. 134–144.
4. Судник, Л. В. Применение наноструктур в защитных композиционных материалах / Л. В. Судник, В. С. Ткачук. // Наноструктуры в конденсированных средах. – Минск, 2018. – С. 226–229.

УДК 504.3

### Экологические проблемы авиации в курсе физики

Кириленко А. И., Шаведдинова К. В.  
Белорусская государственная академия авиации  
Минск, Республика Беларусь

*В работе анализируются факторы воздействия авиации на окружающую среду. Сравниваются данные из различных литературных источников. Показано, что имеющиеся данные зачастую подаются некорректно, методики расчетов не приводятся. Численные значения по эмиссии парниковых газов у разных авторов отличаются в разы. Производится сравнение антропогенной и природной эмиссии парниковых газов. Выясняется роль авиационной отрасли в загрязнении окружающей среды.*

Авиация – одна из наукоемких отраслей хозяйственной деятельности. Процессы, протекающие при подготовке летательных аппаратов к полету, сложны и многообразны, как и сам процесс полета. Однако в последнее время наиболее актуальными стали проблемы экологии. Это связано с ускорением темпа жизни и с обострением конкуренции между отдельными видами транспорта. Многочисленные и противоречивые данные, появляющиеся в Интернете и в СМИ, дают повод для анализа вредных факторов воздействия деятельности человека на окружающую среду (ОС). Экологические проблемы дают обширный материал для проведения занятий по физике, особенно по разделу «Молекулярная физика и термодинамика». Некоторые из таких задач рассматриваются в работе. Целью работы является сопоставление различных данных по воздействию на ОС природных процессов, транспорта и авиации, в частности, применяя стандартные физико-математические методы.

Часто приводимые оценки эмиссии  $\text{CO}_2$  и других «парниковых» газов больше дают на эмоции, чем представляют реальную картину. Методики получения этих оценок не обсуждаются и не раскрываются.

Экологическим проблемам в авиации уделяется достаточно пристальное и постоянное внимание [1]. Эти проблемы обострились в последнее время, поскольку некоторые страны стали интенсивно увеличивать объем грузоперевозок авиационным транспортом (в Китае за 2018 г. рост составил 50 %, в США – 10 %). Вместе с тем на одну тонну груза при перевозке на один километр выбрасывается граммов  $\text{CO}_2$ : самолетом – 560; автомобилем – 47; поездом – 18; судном-контейнеровозом – 3 (усредненные значения). Однако объемы грузоперевозок разные и, в результате, в мировом масштабе автомобильный транспорт выбрасывает в атмосферу в год 11,5 Гт, а полеты гражданской авиации – 2,3 Гт.

Грузооборот воздушным транспортом (по данным по 118 странам) [2] составил в 2018 г. 220 424 млн. тонно км. Это обеспечило эмиссию  $\text{CO}_2$  в размере 0,123 Гт. По другим данным – 0,311 Гт по 53 ведущим странам, 2005 г. [2], что в общем-то сопоставимые, но разные величины.

Кроме того, при сгорании авиатоплива обеспечивается эмиссия водяных паров – самого мощного парникового газа, в количествах 0,048 Гт в год, так как 1 кг сожженного керосина обеспечивает эмиссию 3,15 кг  $\text{CO}_2$  и 1,23 кг  $\text{H}_2\text{O}$  [1].

Также стоит учесть, что высота горизонтального полета самолетов достигает  $9 \cdot 10^3$  м. В эту область и поступает указанное количество водяных паров. По оценкам прибавка одной молекулы воды на  $10^6$  молекул воздуха в стратосфере влечет за собой изменение суммарного теплового потока через верхнюю границу тропосферы на  $0,29 \text{ Вт/м}^2$  [3]. По оценкам [3] через

тропическую тропопаузу в стратосферу ежегодно поступает от 0,33 до 1,13 Гт паров воды.

Пусть указанное количество водяных паров распределяется в слое  $\Delta h \approx 2$  км на средней высоте 9 км. Следовательно, плотность водяного пара в этом слое составит  $5 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда на высоте тропической тропопаузы (17-18 км), то есть в нижней стратосфере, плотность водяных паров составит в 2,7 раз меньше. Итого по этой модели в нижнюю стратосферу в год поступает  $6 \cdot 10^{17}$  молекул воды. Оценка произведена по модели изотермической атмосферы и, конечно, явно завышена, но она четко показывает, что авиация оказывает существенное влияние на ионосферу. Представляет интерес сравнить изменение теплового потока, обусловленного поступлением молекул воды с изменениями, вызванными астрономическими факторами.

Солнечная постоянная в настоящее время принимается равной  $1365,98 \pm 0,02$  Вт/м<sup>2</sup>. В 23 (коротком) цикле она составила 1365,79, а в максимумах 21 – 23 циклов – 1365,57; 1365,50; 1365,17 (по отношению к среднему значению), с 1.07 по 1.09 2008 г. – 1365,10. Как видим, изменения сравнимы.

Общий выброс CO<sub>2</sub> в атмосферу за 2018 г. в результате жизнедеятельности человечества ( $7,7 \cdot 10^9$  человек) составил 2,1 Гт CO<sub>2</sub>. Энергопотребление человечеством составляет  $0,6 \cdot 10^{21}$  Дж в год (из них нефть + газ + уголь обеспечивают 81 %), что обеспечивает эмиссию 31,8 Гт (2008 г.), 33 Гт (2019 г.) [2]. Для сравнения заметим, что наземные и водные растения ежегодно включают в состав органического вещества не менее 175 Гт углерода, содержащегося в виде CO<sub>2</sub> в атмосфере и в воде (в виде растворенных карбонатов), что составляет 631,7 Гт CO<sub>2</sub>.

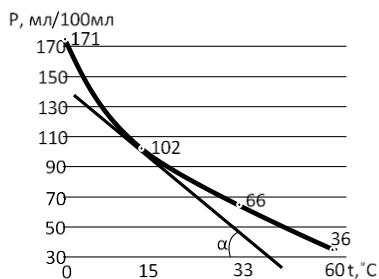


Рис. Растворимость CO<sub>2</sub> в воде в зависимости от температуры

Считается, что основным резервуаром CO<sub>2</sub> на Земле является Мировой океан. При охлаждении он поглощает углекислый газ, а при нагревании отдает. Представляет интерес проверить те оценки, которые приводятся в

разных источниках. По одним данным [4] в 131 см<sup>3</sup> воды при 0 °С и давлении в 1 атм растворяется 1,713 см<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>, а при 20 °С – 0,878 см<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>. (ρ<sub>со</sub> = 1,95 кг/м<sup>3</sup>), что дает при 0°С – 3,34 г; а при 20 °С – 1,67 г. При линейной интерполяции по этим двум точкам для 15 °С получаем, что в 1 см<sup>3</sup> воды растворяется 1,087 г СО<sub>2</sub>. По другим данным [5], приведенным на рисунке в виде графика, определим изменение растворимости углекислого газа в воде вблизи температуры 15 °С - средней температуре Земли. Проведем касательную к графику в точке  $t = 15$  °С, определим тангенс угла ее наклона к оси температур. По рисунку 1:  $\operatorname{tg}\alpha = \frac{130-30}{41,8-8,6} = \frac{100}{33,2} = \frac{3\text{мл}/100\text{мл}}{1^\circ\text{C}}; \quad \frac{\Delta P}{\Delta t^\circ} = \operatorname{tg}\alpha;$

$$\Delta P = 3 \cdot \Delta t^\circ \frac{\text{мл}}{100 \text{ мл}}.$$

В соответствии с графиком в 100 мл воды при 15 °С растворено 102 мл СО<sub>2</sub> или 1,98 г в 1 мл воды. Различие с приведенными ранее данными в 2 раза. Как видим, любые расчеты хотя и просты, но дают неоднозначные ответы.

Вклад авиации в экологические проблемы, в сравнении с многочисленными природными процессами эмиссии парниковых газов, не столь высок. Авиация, в сравнении с другими, является относительно «чистым» видом транспорта, ее влияние на климат и экологию может со временем стать ощутимым из-за постоянно увеличивающегося воздушного трафика, приводящего к росту загрязнения в верхних слоях тропосферы. Хотя в настоящее время оценки такого влияния являются весьма неопределенными. Следует подчеркнуть, что локальные загрязнения от авиационного транспорта весьма серьезны, но еще более трудно учитываемы.

### Литература

1. Асатуров, М. Л. Загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах / М. Л. Асатуров. – С.-Петербург: Университет ГА., 2010. – 95 с.
2. Мировой атлас данных / кноема [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knoema.ru/atlas>. – Дата доступа: 12.05.20203.
3. Александров, Э. Л. Человек и стратосферный озон / Э. Л. Александров, Ю. С. Седунов. – С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1979. – 54 с.
4. Волков, В. А. Большой химический справочник / В. А. Волков. – Минск: Интерпрессервис, 2005. – 608 с.
5. Способность Мирового океана поглощать антропогенный СО<sub>2</sub> сокращается // РИА Новости [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://ria.ru/20091119/194480781.html>. Дата доступа: 21.02.2020



УДК 65:378:371.

**Актуальность внедрения инновационного обучения экологическим знаниям при подготовке специалистов нефтегазовой промышленности**

Алюбова И. Х.

Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова  
Ташкент, Республика Узбекистан

*Статья посвящена системе профессиональной подготовки специалистов нефтегазовой промышленности, основанной на интеграции образования, науки и производства. Данная система призвана активизировать практическую направленность обучения специалистов для нефтегазовой отрасли, повысить качество подготовки. При этом особое внимание уделяется одному из самых важных аспектов образования – экологической культуре специалистов.*

Вопросы внедрения экологического образования и формирования культуры экологической безопасности в системе образования Узбекистана являются актуальными как в плане их разработанности, так и в плане реализации. С одной стороны, приходится признать, что процесс воспитания экологической культуры неизбежен, и сильно востребован в условиях страны, которая в реальности столкнулась с экологической катастрофой мирового масштаба. С другой стороны, среди населения растет востребованность в отношении знаний по экологической культуре, которая не всегда и полностью удовлетворяется. И с третьей стороны, понятия экологии, экологической культуры, экологической защиты населения показывают довольно быстрое внедрение и развитие во всех областях человеческой деятельности, и, к сожалению, педагогическая наука страны не всегда успевает ввести в свои стандарты требования, которые ставит современная трансформация данных понятий [1-5].

Также можно говорить о многогранности, сложности, многоаспектности педагогического содержания экологического образования. Становится очевидным, что на сегодня очень важно правильно определить наиболее нужные сферы экологического образования, наиболее эффективные формы, методы, средства педагогического процесса по формированию **культуры** экологической безопасности в особенности при подготовке кадров, непосредственно связанных с тем или иным воздействием на экологическую ситуацию. Необходимо признать, что за бортом исследований остается злободневная проблема формирования культуры экологической безопасности при подготовке

кадров таких промышленно-технических специальностей, как нефтегазовая, горнодобывающая, энергетическая, геология и др.

Одним из важнейших условий модернизации и инновационного развития экономики является ее кадровое обеспечение: на предприятиях по всему Узбекистану нужны молодые специалисты, владеющие современными знаниями, имеющие навыки применения этих знаний в своей практической деятельности, а также мотивированные к саморазвитию и достижению профессионального успеха.

В Узбекистане подготовка кадров, которые будут заниматься экологической деятельностью, является относительно молодой сферой. Но, учитывая тот факт, что в стране есть критические ситуации, связанные с острой экологической катастрофой, очевидна большая потребность в подобных специалистах. Стране нужны специалисты-экологи и стране нужны, специалисты, ориентированные на защиту экологической безопасности.

По некоторым сведениям, за последние сто лет в мире исчезли более 500 видов растений, более 600 видов животных и птиц. В то же время, существует опасность исчезновения многих и многих новых видов. Хотя каждый вид участвует в кругообороте природы и имеет свою задачу в ней, которую не может выполнить другой вид. Все виды имеют свое место в естественном равновесии сил в природе. Поэтому, становится актуальным сохранение биологического разнообразия. Следовательно, в подготовке кадров в таких сферах, как нефтегазовая, горнодобывающая, энергетическая специальность и геология её направленность на соблюдение экологической безопасности должно стать незыблемым, ясным и конкретным.

Для осуществления данной поставленной задачи следует использовать такие категории учебного процесса, как разрядка специальностей, учебные стандарты, содержание учебных программ и учебников, разработку технических требований, правовую осведомленность, техническое оснащение рабочего места, использование оборудования и т.д.

При подготовке кадров особое значение приобретает их экологическая культура. Но экологическая культура требует их осведомленности по многим параметрам, так как в нынешнее время экологические науки все больше относятся к фундаментальной сфере. В состав экологических наук входят экологическая защита, экологическая безопасность, знания о биологии, геологии, химии, праву, истории экологии, знания о земле, воздухе, природных ресурсах, знания о естественных ископаемых, опыт в проведении лабораторных работ и многие другие. В годы независимости у нас в стране особое внимание уделялось именно подготовке кадров по защите окружающей среды. Но сегодня ситуация меняется и требуется многопрофильные специалисты в данной сфере. И, с другой стороны, одними кадрами с узконаправленной экологической устремленностью проблему трансформации общественного

сознания не изменить. Развитие мышления в области экологической безопасности должно быть, как минимум, у всех специалистов, которые так или иначе соприкасаются с природой и окружающим миром. В то же время, во многих современных отраслях требуются универсальные специалисты, которые бы не только становились значимыми элементами промышленного роста, но и могли обеспечить его развитие на многие годы вперед и имели креативное мышление, могли прогнозировать дальнейшее развитие отрасли. Поэтому сегодня речь идет о специалистах, которые бы владели наряду с естественно-научными, социально-экономическими, инженерно-техническими знаниями и экологически значимыми навыками.

Следовательно, системе подготовки кадров необходимо учитывать реальные условия промышленной деятельности с целью определения характера, уровня и содержания знаний, навыков и умений, которые требуются на сегодняшний день в промышленности.

Из вышесказанного видно, что вопросы экологического образования и формирования экологической культуры подрастающего поколения в Узбекистане являются одним из важнейших задач системы образования страны.

Учитывая состояние и перспективы развития экологической ситуации в Узбекистане, в различных регионах страны, учитывая угрозы, которые могут иметь при резком росте нефтегазовой, горнодобывающей, энергетической промышленности и геологии, необходимо уже сегодня трансформировать процесс подготовки кадров, особо уделяя внимание на экологическую составляющую этих специальностей. Поэтому будет вполне оправданным, чтобы готовящиеся кадры перечисленных специальностей были ознакомлены и основами биологического разнообразия региона, биосферой, экологической биотехнологией, геоэкологией, нормами экологического загрязнения и факторами их уменьшения, техногенными системами, экологическими рисками своей специальности, экологическим мониторингом специальности, экономикой использования природных ресурсов. Все это требует разработки новых учебных программ, совершенствования содержания учебных программ, учебников и пособий. Это большая структурная работа, которая требует системности и лояльности со стороны руководящих образовательных структур и систем. Естественно, что нужны различные научные журналы и издания, освещающие экологические проблемы как современности, так и конкретно нашей страны.

Следовательно, чтобы развить систему экологического образования, в частности, при подготовке кадров нефтегазовой, горнодобывающей, энергетической, геологической специальностей, необходимо прежде всего внедрить все новые направления и веяния экологического образования в нашу отечественную систему образования и подготовки кадров. Необходимо обеспечить многопрофильность и универсализм наших специалистов. Нужно

перейти к экологическому мониторингу и прогнозу по всем специальностям, которые так или иначе связаны с защитой окружающей среды. Нужно внедрить все инновационные замыслы, идеи, оборудование, аналитику, методы прогнозирования в систему образования, чтобы процесс формирования кадров велся в соответствии с реальными условиями их будущей деятельности. Все это требует создания инновационных моделей подготовки кадров и создания соответствующей инфраструктуры образования.

### Литература

1. Бозорова, Н. Научно-педагогические основы формирования экологической культуры у студентов: автореф. дис. ... канд. пед. наук / Н. Бозорова; – Ташкент, 2006. – 23 с.
2. Жуманова, Ф. У. Формирование экологической культуры у учащихся профессиональных колледжей: автореф. дис. ... канд. пед. наук / Ф. У. Жуманова; – Ташкент, 2010. – 21 с.
3. Маликова, А. Р. Формирование экологической культуры у студентов высших педагогических учебных заведений: автореф. дис. ... канд. пед. наук / А. Р. Маликова; – Ташкент, 2009. – 20 с.
4. Султонов, П. С. Экология и охрана окружающей среды / П. С. Султонов, Б. П. Ахмедов // Международное экологическое сотрудничество. – Ташкент: Издательско-полиграфический творческий дом имени Гафура Гуляма, 2004. – С. 211–222.
5. Гарифуллина, З. А. К вопросу о необходимости повышения экономической привлекательности программ по защите экологии на предприятиях нефтегазовой отрасли / З. А. Гарифуллина // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 3. – С. 147–149.

**Лингводидактическое обеспечение  
технического образования**

**Описание картинки как вид аудиторной и внеаудиторной самостоятельной работы студента по иностранному языку в техническом вузе**

Ляшенко Е. С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Данная работа посвящена отдельному виду самостоятельной работы студентов по иностранному языку – описанию картинки/фотографии, которое можно выполнять в рамках аудиторных и внеаудиторных занятий. В частности, дается характеристика алгоритма и предлагается набор языковых средств, необходимых для успешного выполнения такого задания.*

Самостоятельная работа (СР) в современном образовательном процессе рассматривается как особая форма организации обучения. Как в аудиторное, так и внеаудиторное время она должна обеспечивать самостоятельный поиск нужной информации, творческое восприятие и осмысление учебного материала, разнообразные формы познавательной деятельности, развитие аналитических способностей, совершенствование навыков контроля и планирования учебного времени, выработку умений и навыков рациональной организации учебного труда [1, с. 4].

СР студентов классифицируется по разнообразным критериям: по месту организации (аудиторная и внеаудиторная работа); по целям организации (цели дисциплины, сформулированные и обоснованные в рабочей программе); по способу организации (индивидуальная, парная, групповая). В зависимости от формы организации обучения (лекция, семинар, практическое занятие, контрольное занятие, внеаудиторное занятие и др.) можно выделить следующие виды самостоятельной работы: написание реферата, написание эссе, подготовка доклада, презентации, курсовой работы/проекта, написание конспекта, составление глоссария, кроссворда, выполнение кейс-задания, построение обобщающей таблицы и многие другие.

При обучении иностранному языку в техническом вузе, в частности, студентов архитектурного факультета, популярным заданием для индивидуальной самостоятельной работы является описание картинки, изображающей архитектурный памятник, выполненный в определенном стиле и представляющий конкретный период в истории мировой архитектуры. Как показывает наш опыт, описание на английском языке картинки или фотографии – это довольно эффективное упражнение, способствующее развитию коммуникативных и познавательных умений студентов. Оно не только нацелено на

совершенствование навыков устной и письменной речи, но и является хорошим средством повышения мотивации, развития наблюдательности и творческой активности обучающихся [2].

Предваряющим этапом данного вида самостоятельной работы является ознакомление и усвоение студентами алгоритма описания картинки и языковых средств, необходимых для этого. Студентам предлагаются разнообразные упражнения, позволяющие выработать умения составления монологического высказывания.

Одним из наиболее эффективных заданий является расширение уже готового описания с использованием всевозможных языковых средств. Например, завершая изучение темы: «The Renaissance», студентам специальностей 1-69 01 01 и 1-69 01 02 архитектурного факультета предлагается следующий материал:

- 1) картинка с изображением собора Св. Петра в Риме:



Рис. St Peter's Basilica

2) краткое описание данного сооружения на английском языке: *In this picture St Peter's Basilica is depicted. It contains a portico. The columns support an entablature. Above the entablature there is a pediment. The windows are framed by an arch and flanked by engaged columns. The upper level is surmounted by a balustrade with statues. A dome crowns the cathedral.* Задача студентов – распространить данный текст с помощью определений, причастных и деепричастных оборотов, придаточных предложений и т. д.

Что касается непосредственно алгоритма, то для самостоятельного описания, скажем, внешнего облика какого-либо сооружения студентам рекомендуется следовать определенному плану:

- 1) *name and location*;
- 2) *outline/silhouette*;

- 3) *building materials*;
- 4) *ground-plan/forms*;
- 5) *structural elements*;
- 6) *doors and windows*;
- 7) *decoration*.

Далее для каждого пункта плана предлагается набор языковых средств (*Useful phrases*), которые студенты должны использовать для грамотного последовательного выражения своих мыслей:

1. *This picture/photo shows ... / In this picture ... is depicted / In the centre/middle of the photo we can see a ... / In the foreground there is a ... / The building (house, temple, cathedral, etc.) is located/situated in ... .*

2. *The building (outline, exterior, façade, etc.) is ... / Seen from the outside the building is ... / The ... outline is relieved by a ... .*

3. *It is made of (built of/in, constructed from) ... .*

4. *The ground-plan is ... / The ground-plan is in the shape of ... / The building is ... in plan / The building forms a ... in plan / The building is characterized by ... forms / The volume is articulated with ... forms.*

5. *It is characterized by ... structures / The main structural elements are/include ... / The structure is based on a combination of ... .*

6. *The main door is placed from ... / The door/door opening/doorway is flanked (framed, surmounted) by ... / The windows are ... / The windows are filled in with ... / The windows are framed by ... .*

7. *The façade/exterior is decorated (enriched, adorned, embellished) with... / The façade/exterior is characterized by ornate (richly decorated, intricately decorated, elaborately carved, etc.) ... / The exterior features ... .*

Таким образом, внедрение в практику преподавания иностранного языка в техническом вузе такого творческого вида работы, как описание картинки, позволяет закрепить полученные знания по пройденной теме, совершенствовать навыки осознанного использования языковых средств, формировать самостоятельность мышления.

### **Литература**

1. Самостоятельная работа студентов: виды, формы, критерии оценки : учеб.-метод. пособие / А. В. Меренков [и др.] // М-во образ.и науки Рос. Федер., Урал. ун-т. ; под общ.ред. Т. И. Гречухиной, А. В. Меренкова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 80 с.

2. Описание на английском языке картинки или фотографии [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://www.pioneerrec.ru/100-opisanie\\_na\\_anglijskom\\_yazyke\\_kartinki\\_ili\\_fotografii/](https://www.pioneerrec.ru/100-opisanie_na_anglijskom_yazyke_kartinki_ili_fotografii/). – Дата доступа: 11.05.2020.



**Фармаванне іншамоўнай лексічнай кампетэнцыі студэнтаў  
тэхнічнай ВНУ**

Макарыч М. В., Салей М. В.  
Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт  
Мінск, Рэспубліка Беларусь

*Артыкул разглядае магчымасць выкарыстання фрэймавых мадэляў з мэтай фармавання актыўнага слоўніка студэнтаў падчас практычных заняткаў на англійскай мове. Падаецца дэталёвае апісанне структуры фрэйма для стварэння тэрміналагічнага слоўніка архітэктурнай тэматыкі.*

Сучасная канцэпцыя навучання замежнай мове ў тэхнічнай ВНУ патрабуе асаблівых падыходаў як да працэсу інтэрпрэтацыі тэхнічнага тэксту, так і да працэсу адбору лексічных адзінак для актыўнага слоўніка. Таму фармаванне лексічнай кампетэнцыі студэнтаў павінна адбывацца на базе не толькі фармальнага, але і ў роўнай ступені функцыянальнага боку мовы тэкстаў, якія вывучаюцца на практычных занятках.

Набор лексічных адзінак для актыўнага і пасіўнага засваення на ўсіх узроўнях навучання прадугледжвае захаванне балансу паміж формай і функцыяй. Іншымі словамі, лексічныя адзінкі разглядаюцца ў якасці кампанентаў адзінай моўнай сістэмы, у якой кожная лексема мае сваю функцыянальную асаблівасць. Для развязку дадзенага задання найлепш падыходзяць фрэймавыя мадэлі.

Універсальнасць фрэйма як лінгвістычнага панятку грунтуецца на тым, што ён можа ўжывацца для даследавання семантыкі як асобнага слова, так і груп словаў. Аднак значэнні моўных адзінак складаюцца з кампанентаў часткова агульных, часткова розных для словаў адной групы. Таму важна вывучаць семантыку, моўныя паводзіны, лексічную і сінтаксічную спалучальнасць кожнай асобнай групы [1]. Дадзеная ўласцівасць фрэйма, як універсальнага сродку для стварэння сітуацыйнай моўнай карціны шырока выкарыстоўваецца ў сучаснай практыцы выкладання замежных моваў [2].

Такім чынам адпаведна стварэння фрэймавыя мадэлі дазваляюць сфармаваць актыўны слоўнік студэнта, куды неадменна ўлучаюцца лексічныя адзінкі, якія намінуюць асноўныя, цэнтральныя паняткі, што знаходзяцца на верхніх узроўнях фрэйма. У слоўнікавы спіс, абавязковы для засваення ў рамках абранай прафесійнай тэматыкі таксама ўваходзіць лексіка, што запаўняе асноўныя вяршыні-тэрміналы абавязковых падструктур адпаведнага фрэйма.

Дадзены падыход быў выкарыстаны на практычных занятках па англійскай мове падчас навучання студэнтаў другой ступені вышэйшай адукацыі архітэктурнага факультэта Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта для стварэння слоўніка тэрмінаў архітэктурнай тэматыкі. Працэс стварэння фрэймавай мадэлі пачынаецца з выбару тэрмінаў, якія намінуюць цэнтральныя паняткі і знаходзяцца на верхніх узроўнях фрэйма. Напрыклад, для тэксту, які апісвае асноўныя этапы будаўніцтва панэльнай канструкцыі, такімі лексічнымі адзінкамі будуць: *foundation* ‘падмурак’; *building skin* ‘будаўнічая абалонка’; *cross beam* ‘папярочная бэлька’; *wall-bearing* ‘апорная сцяна’; *roofing* ‘дах’ і г.д.

З прычыны таго, што фрэйм адлюстроўвае стэрэатыпнае для дадзенай прадметнай галіны ўяўленне аб аб’екце альбо сітуацыі, ён павінен утрымваць набор устойлівых словазлучэнняў, клішэ, уласцівых пэўнаму дыскурсу. Такім чынам, фрэймавы падыход дазваляе ўлічваць вузка прафесійны кампанент падчас адбору іншамоўнай лексікі. Напрыклад, для тэксту, які апісвае архітэктурны праект будынка, ёсць ўласцівымі наступныя ўстойлівыя словазлучэнні: *collaborative design* ‘комплекснае праектаванне’; *core sections of the project* ‘асноўныя раздзелы праекта’; *urban revitalization* ‘аздараўленне гарадскога асяроддзя’; *insulation glazing* ‘ізаляцыя праз шкленне’; “*off-the shelf*” *price* ‘канчатковы кошт’; *sound-proof glass rooms-cubes* ‘гуканепранікальныя шклянныя пакоі, што захоўваюць прапорцыі куба’ і г.д.

Адна з перавагаў фрэймавай мадэлі – гэта відавочнае адлюстраванне ўжытнасці асобных катэгорый лексікі і частотнасць выкарыстання адзінак пэўных лексіка-семантычных груп. Напрыклад, тэксты, у якіх падаюцца асноўныя характарыстыкі прынятых да выканання праектных развязкаў, спецыфікуюцца выкарыстаннем вялікай колькасці навукова-тэхнічных тэрмінаў, якія дазваляюць прааналізаваць слушнасць выбару інжынерных сістэм і камунікацый. Дадзеная лексіка займае сярэднія слоты фрэймавай мадэлі: *original cellular logic of the geometry* ‘выточная вачкаватая логіка геаметрыі’; *thermal capacitance* ‘цеплаёмістасць’; *feasibility study* ‘тэхніка-эканамічнае абгрунтаванне’; *shear lag* ‘запазненне зруху’ (нераўнамернае размеркаванне на грузкі па восі канструктыўнага элемента); *pinning* ‘узмацненне падмурка’; *excessive sagging* ‘празмернае правісанне’; *obstruction to slip-forming* ‘супраціўленне слізгацённю’ і г.д.

Архітэктурны праект таксама ўключае і частку з апісаннем паслядоўнасці будаўнічых прац. Менавіта такога кшталту тэксты характарызуюцца лагічнай арганізацыяй і спарадкаванасцю: паслядоўным пераходам ад ужывальных будаўнічых тэхналогій – да канструктыўных матэрыялаў і абсталявання. Дадзеная група лексічна напаўняе падструктуру тэхнічнага апісання праекта: *aluminous firebrick* ‘алюмасілікатная цэгла’; *bituminous*

*concrete* ‘бітумны бетон’; *adobe* ‘саман’ (будаўнічы матэрыял з гліністага грунту, высушанага на вольным паветры); *wire mesh* ‘арматурная сетка’; *porous concrete* ‘вачкаваты бетон’ і г.д.

Згаданая група лексікі напаўняе падструктуру апісання архітэктурнага праекта і вызначае яго асноўныя тэхнічныя элементы, што адрозніваюць яго ад іншых падобных праектаў. Прыведзеныя тэрміны запаўняюць асноўныя ніжнія слоты разгляданай структуры фрэймавай мадэлі і таксама ўключаюцца ў склад актыўнага слоўніка для вывучэння.

Аднак аналіз лексікі, што запаўняе разгляданую падструктуру апісання асноўных характарыстык прынятых праектных развязкаў, выявіў нечакана нізкую частотнасць ужытку прыметнікаў формы і колеру. Выкарыстанне прыметнікаў гэтай лексіка-семантычнай групы з’яўляецца хутчэй выняткам, што адлюстроўваецца ў напаўненні слотаў адпаведнага ўзроўню фрэймавай структуры. Такім чынам, значэнне колеру і формы застаецца імпліцытным у разгляданым дыскурсе.

Трэба адзначыць, што апісаны вышэй падыход спрыяе тэматычнаму парадку групойкі лексікі: лексічныя адзінкі можна ўводзіць міні-групамі, з’яднанымі ў адпаведнасці з падструктурамі фрэйма. Выкарыстанне дадзенага спосабу групойкі лексічнага матэрыялу захоўвае сэнсавыя сувязі паміж кампанентамі, якія будучы інжынер засвойвае разам з асноўным значэннем лексічных адзінак, такім чынам, можа іх лёгка аднавіць, ствараючы свой уласны тэхнічны тэкст, прыкладам, для рэгістрацыі патэнта на вынаходства.

Усё вышэйпададзенае сведчыць пра тое, што фрэймавае мадэляванне з дапамогай структурных мадэляў узнаўляе стэрэатыпныя ўяўленні студэнта тэхнічнай вучылішча пра мову тэхнічнай літаратуры. Адлюстроўваючы агульныя канцэпцыйныя структуры, што існуюць у тэхнічных апісаннях, дадзены падыход мае шэраг пераваг і можа быць скарыстаным падчас навучання замежнай мове ў тэхнічнай вучылішча. У структурнай характарыстыцы і ў слоўнікавым напаўненні фрэймавых мадэляў адлюстроўваюцца спецыфічныя рысы навукова-тэхнічнага стылю і яго падкрэсленая лагічнасць выкладу. Апроч таго, працэс напаўнення вяршынь-тэрміналаў і астатніх слотаў фрэйма робіць больш эфектыўнай працэдуру адбору і падачы патрэбнага лексічнага матэрыялу.

### Літаратура

1. Макарич, М. В. Изучение структуры фрейма технических текстов архитектурно-строительной тематики // Вестн. Минск. гос. лингв. ун-та. Сер. 1, Филология. – 2015. – № 4 (77). – С. 104–111.
2. Малинина, Ю. А. Фреймовое моделирование в обучении иностранному языку / Ю. А. Малинина // Вестн. МГПУ им. И. П. Шамякина. Сер. Педагогика. – 2013. – № 2 (39). – С. 55–58.

**О роли системного подхода в обучении английскому языку  
в техническом университете**

Мартысюк Н. П.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Предлагаются возможности реализации принципа системности при обучении иностранному языку в техническом вузе. При данном подходе осуществляется упорядоченное и взаимосоотнесенное обучение языку как средству общения в условиях моделируемой на учебных занятиях речевой деятельности.*

Иностранный язык признается обязательным компонентом профессиональной подготовки в техническом вузе. В условиях дефицита академических часов, отводимых на весь курс подготовки, перед преподавателем поставлена задача формирования умений, необходимых будущим специалистам, для решения проблем внедрения достижений отечественной и зарубежной науки и техники средствами иностранного языка, а также для решения проблем, связанных с профессиональной деятельностью будущих специалистов – сбор, анализ, обработка и систематизация научно-технической информации по направлению профессиональной деятельности в связи с использованием современных информационных технологий. Специфика вуза, таким образом, определяет как само содержание обучения, так приемы и методы преподавания языка.

В свою очередь, содержание обучения определяется тематикой, соответствующего избранной сфере профессиональной деятельности материала, которая и составляет основу учебных пособий, разрабатываемых преподавателями иностранного языка. Однако, как показывает наш анализ, имеющиеся издания, обучающие «английскому языку для специальных целей (ESP)» имеют ряд, с методической точки зрения, недостатков. Например, содержат недоступные для понимания студентов 1 курса учебные тексты; перед текстом отсутствует словарь с тщательно отобранной лексикой; не разработан комплекс предтекстовых заданий, который бы оптимизировал работу с текстом; основная работа строится на чтении и переводе текста, репродуктивных упражнениях и пр. Понятно, что об эффективности такого подхода к преподаванию языка говорить не приходится.

Учебное пособие «Английский язык для строителей тепловых и атомных электростанций» авторов Н. П. Мартысюк, Ю. В. Бекреевой [1] представляет собой пример системного подхода к обучению английскому языку,

поскольку отвечает принципам целостности, структурности и иерархичности изложения практических наработок авторов. В результате такого подхода формируется, реализуется и действует система владения иностранным языком как средством общения, причем общения как в устной, так и в письменной формах.

Научно-теоретической основой пособия является современное понимание лингводидактического аспекта смыслового восприятия, предполагающее научение вдумчивой работе с учебным материалом посредством преодоления коммуникативных барьеров при помощи педагога. Поэтому данное пособие – это систематизированный учебный материал, направленный на многостороннее активное взаимодействие студента и преподавателя в ходе учебного процесса. Основная его цель – формирование навыков профессионально-ориентированной и деловой устной и письменной речи на базе лексико-грамматического материала, предусмотренного программой курса.

Пособие охватывает все виды речевой деятельности – чтение, аудирование, говорение и письмо и включают 5 тематически объединенных разделов (Units), каждый из которых состоит из трех-четырёх подразделов (Sections). Каждый раздел завершается дискуссией по теме и контрольным заданием. Композиция пособия определяется необходимостью одновременного и равномерного повторения пройденного лексико-грамматического материала и усвоения новой профессионально-ориентированной лексики.

Структура подразделов однотипна:

1. Фонетические упражнения (Pronunciation Practice) базируются на знакомом материале и построены по принципу обучения аппроксимированному произношению – произношению свободному от фонологических и грубых нефонологических ошибок, и по принципу прагматической уместности речевого акта.

2. Грамматические упражнения (Grammar Practice) основываются на пройденном материале и предвосхищают лексико-грамматические и синтаксические трудности учебного текста. Основная задача пособия здесь – научить студентов понимать разного рода грамматические конструкции, а не активировать их.

3. Учебный текст и упражнения к нему (Reading Practice) включают словарь к тексту (Vocabulary Notes for Study) с транскрипцией и переводом тематической лексики, предтекстовые фонетические упражнения, собственно учебный текст и комплекс послетекстовых заданий – грамматических (Language Focus), тренировочных речевых (Comprehension Check) и условно-речевых (Speaking Practice, Writing Practice), которые предназначены для обучения и контроля понимания текста, для изучения языковых особенностей и тематического содержания текста и носят репродуктивно-продуктивный характер.

Сам же учебный текст рассматривается как структура управления учебными действиями в обучении аспектам языка (фонетике, лексике, грамматике) и видам речевой деятельности (чтению, говорению, аудированию и письму). Представляя собой систематизированный образец функционирования языка в рамках изучаемой темы, он отражает нормативное употребление языка и удовлетворяет требованиям ясного и понятного выражения мысли.

4. Комплекс упражнений для обучения аудированию и говорению (Listening and Conversation Practice) предполагает формирование навыков восприятия иноязычной профессионально ориентированной речи на слух и совершенствование умений порождения высказывания в устной или письменной форме.

Послетекстовые задания – грамматические (Language Focus) и тренировочные речевые (Comprehension Check), ряд заданий для обучения аудированию и говорению (Listening and Conversation Practice) предназначены для самостоятельной работы студента.

5. Заключительные речевые упражнения по изученной теме (Final Discussion) носят творческий характер и предназначены для более продвинутых в речевом плане студентов.

6. Контрольные задания по теме (Vocabulary and Grammar Test) завершают каждый раздел, снабжены ключами для самоконтроля.

7. Раздел 6 (Unit 6) содержит дополнительные тексты с упражнениями для просмотрового и поискового чтения, формирует навыки работы с научно-техническим текстом: способностью выполнять реферирование, аннотирование и перевод. Задача студента заключается, с одной стороны, в том, чтобы извлечь необходимую информацию и догадаться о значении ключевых слов из контекста, с другой стороны, на основе цикла упражнений «Over to You» – развивать умения профессионально ориентированной устной и письменной речи.

Эффективность работы по данному пособию неоднократно проверялась на занятиях со студентами.

### **Литература**

1. Мартысюк, Н. П. Английский язык для строителей тепловых и атомных электростанций : учеб. пособие / Н. П. Мартысюк, Ю. В. Бекреева. – Минск : РИВШ, 2019. – 324 с.

**Интернационализация высшего образования  
и образовательные услуги**

Пузенко И. Н.<sup>1</sup>, Тюкина Л. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого  
Гомель, Республика Беларусь;

<sup>2</sup>Ярославский государственный технический университет  
Ярославль, Российская Федерация

*Глобализация мировой экономической системы и интернационализация высшего образования способствуют повышению доступности высшего образования, его качества, создают благоприятные условия по разработке и внедрению новых инновационных технологий в системе обучения с аудио и видео-сопровождением. Опираясь на достижения компьютерного процесса обучения, они содействуют развитию и укреплению творческих связей и отношений между университетами и странами.*

Современный этап развития общества показывает, что в настоящее время в мире ещё не сложилась единая межнациональная система высшего образования. В то же время страны Евросоюза стремятся создать единую модель высшего образования, согласно которой на обучение граждан других государств будут принимать только тех студентов, которые в достаточной степени или на удовлетворительном уровне владеют языком обучения. Поступающие из-за рубежа абитуриенты на подготовительные курсы вузов должны владеть языком обучения хотя бы в минимальном объёме. На первый курс зачисляются, как правило, тех граждан иностранных государств, которые уже достигли определённых результатов и владеют языком обучения на таком уровне, который позволяет им наравне со всеми студентами участвовать в учебном процессе и получать качественное высшее образование. К примеру, в США, Англии, Германии, Франции и во многих других странах мира не существует отдельных учебных планов для иностранных студентов по первой ступени высшего образования [1].

В славянских государствах, в России, Беларуси, Украине, ещё имеет место система обучения иностранных граждан, которая существовала до и после распада Советского Союза, где языковая подготовка иностранных студентов ведётся на подготовительных курсах и продолжается в процессе получения высшего образования на первой и второй ступенях. Вследствие этого на обучение вузовской специальности принимаются иностранные граждане, имеющие разный уровень языковой подготовки, что, в итоге, становится препятствием к получению качественного высшего образования. В

процессе глобализации интернационализация высшего образования и экспорт образовательных услуг являются во многом залогом повышения конкурентоспособности стран и регионов.

В настоящее время выделяют пять основных стратегий интернационализации в сфере высшего образования. Это согласованный подход стран к интернационализации высшего образования на международном образовательном рынке; расширение научно-образовательных возможностей и услуг; получение дохода от научно-образовательной деятельности; привлечение квалифицированных кадров из-за рубежа; развитие потенциальных возможностей обучаемых в ходе повышения качества и эффективности учебно-воспитательного процесса.

В условиях интеграции одним из доминирующих принципов согласованного подхода в интернационализации высшего образования выступает международное сотрудничество учреждений высшего образования, которое осуществляется через поддержку студенческой и академической мобильности, путем предоставления стипендий и реализации программ академических обменов, а также программ, нацеленных на создание институциональных партнерств в сфере высшего образования [1].

Привлечение квалифицированных кадров из-за рубежа имеет целью предоставлять иностранным специалистам работу в принимающей стране как средство обеспечения экономического развития и повышения конкурентоспособности страны в экономике знаний. Данная стратегия базируется на системе академических стипендий, а также на программе продвижения высшего образования за рубежом в сочетании с принятием соответствующего визового и иммиграционного законодательства.

Получение дохода от образовательной деятельности основывается на согласованном подходе, на долгосрочных культурных и академических целях, задачах развития страны и на стратегии привлечения квалифицированных кадров из-за рубежа полностью на платной основе. Образовательные услуги предлагаются в данном случае без предоставления государственных субсидий. Давая дополнительный доход вузам, иностранные студенты стимулируют тем самым университеты реализовывать предпринимательскую деятельность на международном образовательном рынке.

Расширение образовательных возможностей и услуг направлено на получение высшего образования за рубежом. Важными инструментами этого направления выступают программы поддержки зарубежной мобильности государственных служащих, ученых, преподавателей и студентов и обеспечение иностранным вузам, программам и преподавателям благоприятных условий для коммерческой образовательной деятельности в той или иной стране.



Развитие потенциальных возможностей студентов нацелено при этом на максимальную динамику подвижности и гибкости процесса обучения. Языковая подготовка иностранных студентов и уровень их знаний должны стать основой для формирования соответствующей программы обучения и их профессиональной подготовки. На практических (семинарских) занятиях рекомендуется создавать такую обстановку, которая бы учитывала уровень знания языка, интересы, мотивацию, опыт и интеллектуальные потребности, способности и возможности всех обучающихся. При формулировке учебных заданий предлагается отдавать предпочтение разным дидактическим инструкциям, педагогическим указаниям и наставлениям для студентов с разным уровнем IQ и, таким образом, формировать их личностную, социальную и профессиональную компетентность [2].

Белорусская модель высшего лингвистического образования следует образовательной политике многих стран Европы и Америки, а также разрабатывает собственные современные технологии обучения и необходимые компетенции владения иностранным языком, которые способствуют формированию многоязычной личности, способной вести диалог в условиях полиязычной языковой среды. На этапе интернационализации высшего образования большое внимание стало уделяться качественной стороне обучения языкам: разрабатываются и совершенствуются новые образовательные стандарты и учебные программы; ведется государственная работа по созданию национальных учебных пособий и учебников; внедряется система учебно-методических комплексов, электронных курсов обучения иностранным языкам; совершенствуется материально-техническая база процесса обучения для усиления языковой подготовки обучающихся.

В современной белорусской методике обучения иностранным языкам образовательные проекты разрабатываются в русле функционального развивающего обучения, личностно-деятельностного подхода, индивидуализации обучения и организации самостоятельной работы. Также, как и психолого-педагогические процессы в других направлениях, продолжает развиваться и совершенствоваться коммуникативная методика обучения языку, оттачиваются современные технологии обучения всем видам иноязычной речевой деятельности, разрабатываются новые техники контроля знаний студентов.

Изучение иностранных языков не является больше самоцелью, а служит вспомогательным инструментом для реализации приоритетного направления в образовании – образование через всю жизнь, где источником информации о языке на данном этапе становится специальный текст. Научить иностранных студентов извлекать необходимую информацию, осознавать ее важность и значимость для получения специальности и дальнейшего профессионального общения и есть цель преподавателя. Отбор языкового и речевого материала определяется его важностью с точки зрения

функционирования в языке специальности студента, научной и деловой коммуникации. При этом особое значение приобретает изучение типового специального текста как некой модели, которая отражает логико-смысловую и композиционную структуру специального текста профессиональной направленности [2].

Реализация языковой политики в Беларуси, современные технологии обучения корректируют традиционные подходы к образовательному процессу по иностранным языкам. Занимая важное место в процессе компетентного обучения языку и иноязычной речевой деятельности, они определяют новые приоритеты и стратегии обучения наряду с традиционными методами.

Внедрение активных инноваций в академическую среду неразрывно связано с поиском новых путей и средств повышения качественной стороны обучения.

Одним из стратегических направлений становится внедрение в учебный процесс курсов и методических разработок по языку специальности и, соответственно, повышение познавательной активности обучаемых в единстве всех направлений: коммуникативного, общенаучного, профессионально значимого и адаптационного. Также необходима организация аудиторных групповых форм учебной деятельности: дебаты, диспуты, занятия-экскурсии, занятия-игры, занятия-телесты, пресс-конференции, дискуссии, круглые столы и т.д. Совершенствование механизмов системы обучения языку направлено при этом на создание нестандартных психолого-педагогических условий процесса учения, при которых обучаемый может и должен раскрываться как субъект и объект учебной деятельности, работая в составе единой команды.

### **Литература**

1. Пузенко, И. Н. Некоторые аспекты интернационализации высшего образования / И. Н. Пузенко // Вышэйшая школа. – 2014. – № 1. – С. 58–59.
2. Пузенко, И. Н. Коммуникативная компетентность как доминирующая составляющая профессиональной коммуникации / И. Н. Пузенко // Проблемы социально-ориентированного инновационного развития белорусского общества и профсоюзы: материалы XXI Междунар. науч.- прак. конф., Гомель. – Гомель : УО ФПБ МУ МИТСО ГФ, 2017. – С. 214–216.

**Применение искусственного интеллекта в обучении ИЯ**

Чимров А. В., Сидоров В. В., Качалов Н. А  
Томский политехнический университет  
Томск, Российская Федерация

*Целью данного исследования был анализ современных подходов к преподаванию иностранных языков, а также возможность внедрения в данный процесс новейших технологий, в частности, технологии искусственного интеллекта и машинного обучения. В работе показаны существующие разработки в данном направлении, а также предложены другие варианты интеграции данной технологии в учебный процесс.*

**Роль мобильных технологий в обучении ИЯ.** На сегодняшний день почти каждый современный человек имеет в своем распоряжении мобильное устройство с выходом в интернет и возможностью установки мобильных приложений. Существует много дискуссий касательно влияния мобильных устройств на процессы обучения, но одно можно сказать точно – любой образовательный процесс сложно представить без каких-либо мобильных устройств. Данные устройства позволяют обучающимся в любое время и в любом месте получить доступ к учебным и информационно-справочным материалам с целью формирования различных языковых компетенций.

Актуальность исследования обусловлена следующим: в мире идет тенденция к глобализации и применению английского языка как языка международного общения. В связи с чем возникла потребность современного общества в специалистах, владеющих понятийно-категориальным аппаратом и терминологией в соответствии с профессиональной деятельностью [1].

Таким образом, можно предположить, что развитие образования, а в частности обучения ИЯ будет быстрее и эффективней с применением мобильных и других современных технологий, в том числе и технологии «Искусственного интеллекта».

**Искусственный интеллект и его применение в сфере образования.** Что же такое искусственный интеллект (ИИ) и насколько он действительно «интеллектуальный» и почему он «искусственный»? Разобравшись с этими вопросами, можно увидеть огромные возможности данной технологии и сферы её применения. Искусственный интеллект – это способность цифровых устройств выполнять задачи, которые свойственны разумным существам.

Основой любого интеллекта является нейрон. Когда мы говорим о людях – это биологический нейрон, когда о компьютерах – искусственный нейрон. Искусственный нейрон – это математическая функция, задуманная

как модель биологических нейронов. Подвидом ИИ является нейронные сети (представлена на рисунке), которые чаще всего работают следующим образом: искусственный нейрон получает один или несколько входов и суммирует их, чтобы произвести выход или активацию, представляющую потенциал действия нейрона, который передается вдоль его аксона. Обычно каждый вход анализируется отдельно, и сумма передается через нелинейную функцию, известную как функция активации.

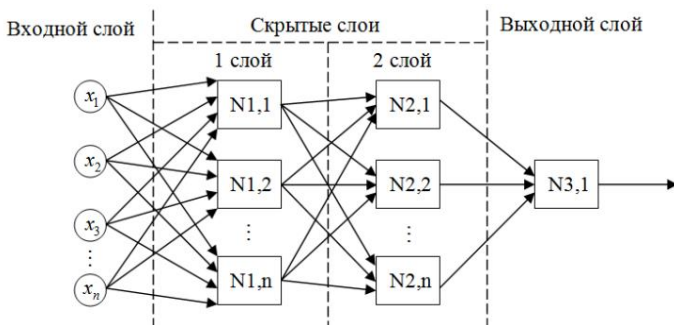


Рис. Простейшая нейронная сеть

Какой бы умной нейросеть ни была, она является продуктом деятельности человека. Таким образом, нейросеть помогает заменить сложные логические алгоритмы. Однако, для корректной работы необходимо обучение любой НС.

Несмотря на футуристичность термина «Искусственный интеллект», данную технологию вряд ли можно назвать новой, на данную тему написано не мало книг и работ, во многих производствах используются сложные интеллектуальные роботы. Сфера образования не является пионером внедрения ИИ, но тем не менее многие образовательные программы или приложения уже используют данную технологию.

Для начала необходимо понимание того, какие процессы и действия способны выполнять ИИ в сфере образования. Чаще всего ИИ покрывает следующие направления образовательной деятельности:

- оценку знаний учащихся;
- актуализацию знаний;
- оценку деятельности учителя;
- виртуальных помощников;
- персональный подход;
- адаптивное обучение.

Огромную помощь ИИ оказывает различным сервисам по переводу иностранного текста. Не исключением является всем известный сервис Google, который с 2016 встроил в свои переводчики технологию «Нейронного машинного перевода Google» (GNMT). GNMT улучшает качество перевода, применяя метод машинного перевода на основе примеров (EBMT), в котором система обучается на информации, найденной в миллионах источниках сети Интернет. Благодаря большой сквозной структуре, система со временем учится создавать более качественные и естественные переводы [2].

В марте 2019 года британская ИТ-компания Century Tech подписала с правительством одного из регионов Бельгии договор о разработке своей платформы обучения, основанного на применении ИИ. По плану за пять лет ею будут оснащены все 700 муниципальных школ региона. Система Century представляет собой компьютерную программу, в которой ученик при регистрации проходит небольшой тест на свои интересы и имеющиеся знания. Исходя из его результатов, программа определяет сильные и слабые стороны школьника, пробелы в знаниях, после чего назначает задачи для их заполнения. Учителя, разумеется, имеют доступ к данным об учениках и отслеживают прогресс в обучении. Сами разработчики говорят, что программа экономит учителям до шести рабочих часов в неделю.

**Предложения по внедрению ИИ в веб и мобильные приложения.** Одно из потенциальных направлений использования ИИ как помощника учителя – подбор учебного материала, оптимального для данной аудитории. Такой подход делает образовательный процесс более объективным, поскольку многие преподаватели склонны увлекаться и преподавать материал, который кажется интересным лично им, но не соответствует учебной программе или скучен для учащихся.

Однако помощник учителя – это не приоритетное направление внедрения ИИ. Поскольку во многих университетах идет уклон на сокращение часов аудиторных занятий, актуальность приобретают мобильные приложения, которые позволяют выполнять работу на дому [3]. Внедрение ИИ в мобильные технологии нам видится следующим образом.

Во-первых, его можно применять как помощника при изучении и последующем выполнении заданий. Например, при выполнении заданий, ИИ в виде помощника, может давать наводящие вопросы и советы, чтобы помочь не прямым ответом, а активизировать мыслительные процессы ученика для запоминания и создания ассоциативных связей. При этом в некоторых типах упражнений ИИ может исполнять роль соперника, что рождает соревновательный момент при изучении, вследствие чего растет интерес к выполнению упражнения. Во-вторых, параллельно ранее сказанным ролям, ИИ может работать и как аналитик. При работе он будет собирать информацию о том, какие упражнения вызывают наибольшую сложность при выполнении

(больше всего ошибок и величина превышения предполагаемой длительности выполнения упражнения). На основе полученной информации ИИ может предоставлять отчет преподавателю, который на основе этих данных может подкорректировать свой курс и увеличить или уменьшить выделяемое время на отдельные блоки.

**Заключение.** Цифровые технологии полностью меняют устоявшуюся модель образования. Как в случае с ИИ в роли помощника преподавателя, так и при внедрении ИИ в мобильные приложения можно выделить следующие достоинства внедрения данной технологии. Во-первых, студентам будет намного интереснее, поскольку данный подход предполагает интерактивный формат обучения. Во-вторых, использование ИИ дает возможность адаптивности и персонализации учебного процесса, чего невозможно достичь на традиционных занятиях. В-третьих, система цифрового оценивания прогресса студента ИИ позволяет преподавателю быстро скорректировать курс обучения. Более того, ИИ позволяет оценить уровень знаний будущего студента и подобрать наиболее результативный формат обучения еще на начальном этапе.

Но как бы ни была заманчива идея полностью автоматизировать учебный процесс, это все-таки невозможно, по крайней мере в ближайшее десятилетие, по разным причинам. Во-первых, учитель в учебном процессе играет роль не только носителя информации, но и наставника, перед которым у учеников всегда есть чувство ответственности. Во-вторых, нельзя забывать о том, что ИИ необходимо обучать, и процесс обучения, или же процесс оценки качества этого обучения будет по-прежнему лежать на преподавателях лингвистах.

### Литература

1. Чайникова, Г. Р. Формирование иноязычной речевой лексической компетенции на основе учебного электронного терминологического словаря тезаурусного типа: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / Г. Р. Чайникова. – Екатеринбург, 2014. – 24 с.
2. Как работает нейросеть Google Translate [Электронный ресурс] // Cossa: сайт. – Режим доступа: <https://www.cossa.ru/trends/196086/> – Дата обращения: 20.03.2020.
3. Всё, что вам нужно знать об ИИ — за несколько минут [Электронный ресурс] // Хабр: сайт. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/416889/> – Дата обращения: 22.03.2020.

**Формирование научно-исследовательских компетенций  
у студентов технического профиля на занятиях английского языка**

Янушкевич Л. М.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Статья описывает возможности формирования и развития компетенций, необходимых для научно-исследовательской работы, на занятиях английского языка со студентами специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены».*

Обучение иностранному языку в вузе технического профиля ставит целью формирование иноязычной коммуникативной компетенции будущего специалиста, позволяющей использовать иностранный язык как средство профессионального и межличностного общения.

Согласно учебной программе БНТУ по иностранному языку (английскому) для специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены», освоение этой учебной дисциплины призвано обеспечить, помимо прочего, формирование у студентов различных компетенций – владения системным и сравнительным анализом и междисциплинарным подходом при решении проблем; умения работать самостоятельно и в команде; владения навыками устной и письменной коммуникации, лингвистическими и коммуникативными навыками; навыками, связанными с использованием технических устройств, управления информацией и работой с компьютером; умения готовить доклады, материалы к презентациям. Очевидно, что все они играют важную роль в научно-исследовательской деятельности.

Рассмотрим, как можно сформировать и развить у студентов такие компетенции на примере ряда практических заданий, разработанных по теме «Метро» для студентов специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены».

Студенты овладевают навыками профессионального общения в области строительства транспортных тоннелей и метрополитенов на втором году обучения.

Работа над темой «Метро» начинается с анализа группы синонимов со значением 'метрополитен' – *underground, subway, metro* и *tube*. Студентам предлагается небольшой оригинальный англоязычный текст, объясняющий разницу в значении и употреблении этих терминов. Затем студенты выполняют подстановочные упражнения на отработку навыков употребления этих лексических единиц.

После того, как студенты ознакомились с историей и методами строительства метрополитенов и овладели необходимой терминологией по теме, им можно предложить для обсуждения текст «Sandra Lighter: Tunnel Engineer» [1], в котором освящаются обязанности инженеров-тоннелестроителей, а также затрагивается проблема гендерного равенства в инженерной профессии. В качестве задания для внеаудиторной работы студенты могут написать эссе о гендерных стереотипах в профессиях, подготовить стендовый доклад о выдающихся женщинах-инженерах или изложить в сочинении своё мнение о праве женщин (мужчин) заниматься традиционно мужскими (женскими) профессиями.

На следующем занятии студенты знакомятся с системой Лондонского метрополитена и сравнивают её с метро других городов мира на основе серии оригинальных текстов «London Underground vs», размещённых на сайте <https://londonist.com>. Студенты делятся на группы по 3–4 человека, каждая группа работает над одним из текстов, оценивая предложенные системы метрополитена по таким критериям как: история и размер метро, качество и удобство электропоездов, простота и информативность указателей, декор станций, стоимость проезда. В процессе работы группы готовят стендовые доклады, взяв в качестве основы диаграммы и схемы текста «London Underground vs New York City Subway» [2]. Готовые доклады вывешиваются для изучения, затем студенты участвуют в обсуждении недостатков и преимуществ метро разных городов. В качестве задания для внеаудиторной работы студентам предлагается сравнить Минский метрополитен с метро других городов (на выбор) по указанным выше критериям и выступить с электронной презентацией на эту тему.

Использование подобных заданий на занятиях по английскому языку показало, что такая организация деятельности студентов стимулирует их творческий подход к подготовке к занятиям, создаёт и укрепляет межпредметные связи со специальными техническими дисциплинами, формирует навыки создания презентаций, публичных выступлений по профессиональной тематике и, таким образом, способствует формированию навыков научно-исследовательской работы.

### Литература

1. Glendinning, E. H. Bridges and tunnels / E. H. Glendinning, A. Pohl // *Technology 2* / E. H. Glendinning, A. Pohl. – Oxford, 2012. – P. 17–21.
2. London Underground vs New York City Subway / Snowden, S. [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://londonist.com/2015/08/london-underground-vs-new-york-subway>. – Date of access: 09.10.2019.



## Содержание

### ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ И ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

<b>Хрусталёв Б. М., Пехота А. Н.</b> Комплексная реализация возможностей получения твердого топлива с использованием отходов.....	4
<b>Хрусталёв Б. М., Пехота А. Н.</b> Подготовка отходов с применением электрогидравлической установки.....	7
<b>Борухова Л. В., Лешкевич В. В., Мороз Д. Р., Черванёва Е. А., Черота Ю. В., Шарапова Н. В., Шибeko А. С., Шолоник В. Е., Якимович Д. Д.</b> Натурные исследования эффективности работы систем вентиляции жилых зданий с газоиспользующим оборудованием .....	13
<b>Данилевский Л. Н.</b> Особенности измерения энергетических показателей зданий на начальной стадии эксплуатации .....	16
<b>Пивень О. В., Данилевский Л. Н., Терехова И. А., Терехов С. В.</b> Расчет потерь теплоты через ограждающие конструкции помещений с учетом теплотехнических неоднородностей при проектировании систем отопления .....	20
<b>Рутковский М. А., Станецкая Ю. А., Павловская А. В.</b> Интеграция гелиоустановки в систему централизованного теплоснабжения .....	24
<b>Бодров М. В., Кузин В. Ю., Морозов М. С., Смыков А. А.</b> Перспективы внедрения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.....	28
<b>Фиалко И. Ф.</b> Основные пути решений современных задач энергосбережения в отапливаемых зданиях Республики Беларусь .....	32
<b>Шибeko А. С., Булух Я. В.</b> Тепловой баланс помещений современных многоквартирных жилых зданий.....	36
<b>Барановский И. В., Башко Ю. А., Козорез А. С., Лихтар С. А.</b> Эффективность применения тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения в условиях Республики Беларусь .....	40

<b>Покотилов В. В., Харитончик А. С.</b> Методика эффективной гидравлической наладки автоматизированных водяных систем тепло- и холодоснабжения.....	43
<b>Эшмухамедов М. А., Кавкатбеков М. М., Абдувалиев А. А., Рахматов А. А., Понамарёва Т. В.</b> Современные пути получения синтетических углеводородов. Технология GTL.....	47
<b>Ахмедов Г., Зокирова З., Каюмова И. К., Рахимова Л. С.</b> Измерение загрязнителей атмосферного воздуха газоанализатором.....	50
<b>Ливанский Д. Г.</b> Температурный режим воздушного пространства многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-арена».....	52
<b>Сизов В. Д.</b> Преимущества применения предварительно разогретых заполнителей при тепловлажностной обработке железобетонных изделий.....	56

## **ВОДОСНАБЖЕНИЕ, ВОДООТВЕДЕНИЕ, ОЧИСТКА ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД**

<b>Аврутин О. А.</b> О перспективных направлениях развития предприятия водопроводно-канализационного хозяйства.....	61
<b>Ёдчик А. В., Дубенок С. А.</b> Критерии отнесения технологии очистки сточных вод к наилучшим доступным техническим методам.....	69
<b>Баканова Д. С., Громадская Е. И.</b> Актуализация картографической и тематической информации о поверхностных водных объектах Республики Беларусь.....	72
<b>Аmeliшко И. Е., Ивашечкин В. В.</b> Лабораторные исследования эффективности очистки водозаборных скважин методами реверсивной импульсно-реагентной регенерации и «реагентная ванна».....	75
<b>Мажайский Ю. А., Гусева Т. М.</b> Влияние мелиоративных мероприятий на гидрохимические характеристики малых рек.....	78
<b>Глинская А. Н., Левачёв Е. В.</b> Особенности хозяйственного использования водоохранных территорий Россонского района.....	82
<b>Музыкаин В. П., Заяц Ю. И.</b> Расчетная оценка вероятности загрязнения подземных вод в результате эксплуатации полей фильтрации.....	86

<b>Голод Ю. В., Дубенок С. А.</b> Условия формирования различных видов сточных вод, поступающих в централизованные системы водоотведения (канализации) для их последующей очистки.....	90
<b>Гук П. С.</b> Анализ режима эксплуатации водопроводных насосных станций для выбора насосного оборудования с целью повышения энергоэффективности .....	93
<b>Ющенко В. Д, Велюго Е. С.</b> Оценка изменения состава подземных вод при работе скважин с многоуровневыми водоносными горизонтами.....	96
<b>Денищик А. И., Лободенко П. В., Пашковская Г. О.</b> Оценка влияния полей фильтрации на подземные воды на примере ОАО «Скидельский сахарный комбинат» .....	100
<b>Захарко П. Н., Дубенок С. А.</b> Водопользование на предприятиях молочной промышленности.....	104
<b>Абдурахманов Х. И., Агзамова Я. С., Арипов А. Х., Мусаев М. Н.</b> Исследование влияния загрязнителей на природные воды.....	108
<b>Турабджанов С. М., Шохакимова А. А., Понамарёва Т. В., Рахимова Л. С.</b> Очистка сточных вод макропористым катионитом.....	110
<b>Ануфриев В. Н., Волкова Г. А.</b> Особенности проектирования реагентного хозяйства по дозированию флокулянтов.....	112
<b>Ануфриев В. Н., Волкова Г. А.</b> Обработка возвратных иловых вод от сооружений по обезвоживанию осадка .....	115
<b>Левкевич В. Е, Бузук А. В., Лосицкий В. А., Саидов Ф.</b> Оценка состояния поверхностных водозаборов и очистных сооружений с использованием беспилотных летательных аппаратов и средств дистанционной диагностики.....	119
<b>Левкевич В. Е., Миканович Д. С., Лосицкий В. А.</b> Экспресс-оценка и анализ причин возникновения деформаций откосов грунтовых ограждающих дамб шламохранилищ и водоемов очистных сооружений.....	123
<b>Линкевич Н. Н., Лемеш М. И., Линкевич А. Н.</b> Исследование технического состояния системы внутреннего водоснабжения здания СКТБ БНТУ .....	127

<b>Рожко С. Н., Вага И. И., Кравченко А. А.</b> Перспективы применения ГИС-технологий для водопроводно-канализационного хозяйства .....	131
<b>Китиков В. О., Башко Ю. А., Козорез А. С.</b> Применение водоподъемного оборудования с синхронным приводом на постоянных магнитах – путь к снижению расхода электроэнергии на водозаборах Республики Беларусь .....	135
<b>Пропольский Д. Э.</b> Модификация фильтрующих загрузок для очистки подземных вод .....	139
<b>Карченя И. В.</b> Методы мониторинга состояния канализационных сетей .....	141
<b>Мороз В. В.</b> Экологичная и ресурсосберегающая реагентная технология совместной очистки сточных вод, содержащих лакокрасочные материалы в машиностроении .....	145
<b>Васильева М. И.</b> Анализ работы напорных и безнапорных станций обезжелезивания воды .....	148
<b>Иванович В. В., Марцуль В. Н., Сапон Е. Г.</b> Интенсификация анаэробного сбраживания осадков сточных вод .....	152

## **ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ И ГИДРАВЛИКА**

<b>Качанов И. В.</b> Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» (ГЭСВТГ) (к 100-летию кафедры 1920-2020 гг.) .....	157
<b>Левкевич В. Е.</b> Моделирование динамики берегов и устойчивости креплений откосов в гидротехнической лаборатории БНТУ .....	164
<b>Смирнов А. И., Гатилло С. П.</b> О строительстве малых ГЭС в Беларуси .....	169
<b>Моргунов К. П., Колосов М. А.</b> Защита ворот шлюзов от навала судов .....	172
<b>Зуев В. А., Двойченко Ю. А., Себина А. С.</b> Новые направления моделирования ледяного покрова с применением композитного модельного льда GP-ice .....	176

<b>Медведева Ю. А., Ивашечкин В. В., Сацута Е. С.</b> Двухуровневая скважина для забора подземных вод.....	188
<b>Афанасьев А. П., Шаталов И. М., Рабченя В. С., Пастушек О. А.</b> Разработка методики определения расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах) .....	192
<b>Богатов А. В., Гарибин П. А.</b> Эффективность увеличения полезных габаритов камер эксплуатируемых шлюзов №№ 1-6 ВБВП .....	196
<b>Богославчик П. М., Рам Бабу Прасад.</b> Уклоны свободной поверхности потока на гребне размываемой плотины.....	200
<b>Дмитриченко А. С., Качанов И. В., Кудин М. В., Шаталов И. М., Щербакова М. К.</b> Численное моделирование истечения огнетушащей жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения.....	204
<b>Дмитриченко А. С., Качанов И. В., Кудин М. В., Шаталов И. М., Щербакова М. К.</b> Численное моделирование движения огнетушащей жидкости в проточной части установки импульсного пожаротушения (УИП).....	208
<b>Гарибин П. А., Ольховик Е. О., Федяшов А. В.</b> Мониторинг технического состояния камеры судоходного шлюза .....	212
<b>Курчевский С. М., Павлов А. А.</b> Технология регулирования уровней грунтовых вод при подпочвенном увлажнении .....	216
<b>Михневич Э.И.</b> Методика расчета устойчивости русел судоходных водотоков .....	219
<b>Моргунов К. П., Ивановский Ю. К.</b> Экспериментальное определение коэффициента шероховатостиметаллических спиральновитых гофрированных труб.....	223
<b>Качанов И. В., Шаталов И. М., Жук А. Н., Филипчик А. В.</b> Реверсивно-струйная очистка металлических и бетонных поверхностей от продуктов коррозии .....	227
<b>Гатилло С. П., Артёмчик А. А., Чуприк А. И.</b> Роль малой ГЭУ в составе комплексной электростанции.....	231
<b>Качанов И. В., Шаталов И. М., Жук А. Н., Филипчик А. В.</b> Коническая насадка с оптимальным углом конусности для гидромониторных стволов.....	235

<b>Стриганова М. Ю., Шаталов И. М., Самедов С. А., Щербакова М. К., Закерничный В. И., Капуза М. А.</b> О неустановившемся движении потока воды в открытых руслах при эксплуатации гидротехнических сооружений.....	238
<b>Казьмирук И. Ч.</b> Роль глубокого рыхления для преобразование поверхностного стока во внутрипочвенный на осушительных системах.....	242
<b>Качанов И. В., Кудин М. В., Шаталов И. М., Кособуцкий А. А., Щербакова М. К., Хвитько К. В.</b> Теоретические и компьютерные исследования дальнобойного пожарного лафетного ствола (ДЛС) при ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах водного транспорта.....	247
<b>Афанасьев А. П., Шаталов И. М., Качанов И. В., Кособуцкий А. А., Ленкевич С. А., Щербакова М. К., Ковалевич В. С., Рапинчук Д. В.</b> К вопросу об использовании конической насадки в водометных движителях мелкосидящих буксирных теплоходов (МБТ).....	251
<b>Левкевич В. Е., Бузук А. В., Касперов Г. И., Мильман В. А., Решетник С. В.</b> Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга берегов и верховых откосов сооружений водохранилищ.....	253
<b>Богославчик П. М., Евдокимов В. А., Немеровец О. В.</b> Условия разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень.....	257
<b>Круглов Г. Г., Линкевич Н. Н.</b> Исследование технического состояния шлюза-регулятора на реке Морочь.....	260
<b>Ключников В. А., Качанов И. В., Ленкевич С. А., Афанасьев А. П., Шаталов И. М., Щербакова М. К., Ковалевич В. С., Рапинчук Д. В.</b> Результаты экспериментальных исследований 3D – моделей корпусов мелкосидящих буксирных теплоходов (МБТ) в гидродинамическом лотке.....	264
<b>Качанов И. В., Шаталов И. М., Ленкевич С. А., Быков К. Ю., Рабченя В. С.</b> Компьютерное моделирование в DEFORM-3D процесса скоростного выдавливания биметаллических резов для дорожных машин.....	268

<b>Крицкая В. И., Ивашечкин В. В., Кондратович А. Н.</b> Прогноз изменения характеристик водозабора подземных вод на основе его обследования .....	271
<b>Коревицкий Г. А.</b> Размеры санитарно-защитной зоны ветроэнергетических установок .....	275
<b>Синица Р. В., Осадчий В. С., Анисимов К. И.</b> Защита акватории морских портов оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля .....	279
<b>Великий Д. И., Слободянюк В. П., Осадчий В. С., Дмитриев С. В.</b> Учет пространственного эффекта при статических расчетах устойчивости грунтовых откосов .....	283
<b>Слободянюк В. П., Осадчий В. С., Великий Д. И., Каракчи Г. Д.</b> Критерии выбора технологии поддержания заданного качества воды в мелководных водоемах юга Украины .....	287
<b>Анисимов К. И., Коломиец С. П., Великий Д. И.</b> Прогноз осадок ростверков причальной галереи, расположенных на слабых грунтах, с учетом процессов консолидации .....	291
<b>Куляк К. А., Анисимов К. И., Великий Д. И.</b> Реконструкция дренажной системы побережья Черного моря г. Одесса .....	294
<b>Дмитриев С. В., Анисимов К. И.</b> Влияние сезонных изменений температуры окружающей среды на устойчивость низового откоса грунтовых плотин .....	298
<b>Качанов И. В., Власов В. В.</b> Оптимизация силового режима при скоростном ударном выдавливании биметаллических стержневых изделий .....	302
<b>Селезнев В. И., Казьмирук Д. В.</b> К определению коэффициента недостатка насыщения грунтов при подпочвенном увлажнении .....	306
<b>Кобяк В. В.</b> Деформационные процессы береговых склонов водохранилищ Республики Беларусь на современном этапе их эксплуатации .....	309
<b>Бузук А. В., Кобяк В. В., Миканович Д. С.</b> Анализ причин и последствий гидродинамических аварий на водных объектах, связанных с разрушением береговых склонов .....	314

## ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

<b>Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А.</b> Болومترический детектор ...	321
<b>Юркевич Н. П., Савчук Г. К., Ахмедов А. П., Мирсаатов Р. М., Темирова М. А., Худойберганов С. Б.</b> Использование компьютерных технологий для контроля знаний студентов при выполнении физического практикума в рамках работы совместного факультета ТИПСЭАД-БНТУ.....	324
<b>Юркевич Н. П., Савчук Г. К.</b> Компьютерное приложение для изучения микродеформаций и микронапряжений в твердых телах по дифракционным пикам.....	329
<b>Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.</b> Расчеты параметров оптических изображений объектов, полученных с помощью датчиков импульсных магнитных полей.....	333
<b>Дорошевич Е. С., Павлюченко В. В.</b> Контроль электропроводящих объектов с использованием гистерезисных свойств преобразователей магнитного поля.....	337
<b>Бибик А. И., Журавкевич Е. В.</b> Использование блочно-модульной системы в преподавании основ физической теории.....	341
<b>Кужир П. Г.</b> Формирование гибких навыков у студентов, изучающих физику.....	344
<b>Попко С. В., Петренко С. И.</b> Применение капиллярного метода дефектоскопии для материалов с многослойными покрытиями .....	347
<b>Кириленко А. И., Шавединова К. В.</b> Экологические проблемы авиации в курсе физики .....	349
<b>Аюбова И. Х.</b> Актуальность внедрения инновационного обучения экологическим знаниям при подготовке специалистов нефтегазовой промышленности.....	353

## ЛИНГВОДИДАКТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<b>Ляшенко Е. С.</b> Описание картинки как вид аудиторной и внеаудиторной самостоятельной работы студента по иностранному языку в техническом вузе .....	358
--	-----



<b>Макарыч М. В., Салей М. В.</b> Фармаванне іншамоўнай лексічнай кампетэнцыі студэнтаў тэхнічнай ВНУ .....	361
<b>Мартысюк Н. П.</b> О роли системного подхода в обучении английскому языку в техническом университете .....	364
<b>Пузенко И. Н., Тюкина Л. А.</b> Интернационализация высшего образования и образовательные услуги .....	367
<b>Чимров А. В., Сидоров В. В., Качалов Н. А.</b> Применение искусственного интеллекта в обучении ИЯ.....	371
<b>Янушкевич Л. М.</b> Формирование научно-исследовательских компетенций у студентов технического профиля на занятиях английского языка .....	375

Научное издание

**ВОДА. ГАЗ. ТЕПЛО 2020**

**Материалы международной научно-технической конференции,  
посвященной  
100-летию Белорусского национального технического университета,  
100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое  
строительство, водный транспорт и гидравлика»,  
90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
8–10 октября 2020 года**

Подписано в печать 28.07.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 22,44. Уч.-изд. л. 17,55. Тираж 100. Заказ 400.

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.