

# СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Construction and industrial safety  
Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture

**№ 15(67) – 2019**

Основан в 1996 году.  
Выходит 4 раза в год (ежеквартально)

**Учредитель:**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (КФУ им. В.И. Вернадского), 295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовым коммуникациям (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61830 от 18 мая 2015 г.

---

Включен в утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (**РИНЦ**)

Главный редактор

**Федоркин Сергей Иванович**, советник РААСН, д.т.н., проф.  
(КФУ им.В.И. Вернадского)

Заместители главного редактора:

**Любомирский Николай Владимирович**, советник РААСН,  
д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского)

**Николенко Илья Викторович**, д.т.н., проф. (КФУ  
им. В.И. Вернадского)

Редакционная коллегия:

**Абдулгасис У.А.**, д.т.н., проф. (КИПУ, Симферополь)

**Бакаева Н.В.**, д.т.н., проф. (ЮЗГУ, Курск);

**Бекиров Э.А.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь);

**Беспалов В.И.**, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону)

**Ветрова Н.М.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь) – руководитель раздела «Экологическая  
безопасность»;

**Графкина М.В.**, д.т.н., проф. (МГМУ, Москва);

**Гузненков В.Н.**, д.пед.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Москва);

**Дворецкий А.Т.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (КФУ  
им. В.И. Вернадского, Симферополь);

**Зайцев О.Н.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь) – руководитель раздела «Инженерное  
обеспечение»;

**Кукунаев В.С.**, советник РААСН, д.т.н., с.н.с. (КФУ им.В.И.  
Вернадского, Симферополь);

**Маилян Д.Р.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-  
на-Дону);

**Нагаева З.С.**, советник РААСН, д.арх., проф. (КФУ  
им. В.И. Вернадского, Симферополь) – руководитель раздела  
«Градостроительство»

**Несветаев Г.В.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ,  
Ростов-на-Дону);

**Пишулина В.В.**, д.арх., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

**Сергейчук О.В.**, д.т.н., проф. (КНУСА, Киев, Украина);

**Серпокрылов Н.С.**, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

**Толстой М.Ю.**, к.т.н., доц. (ИРНИТУ, Иркутск);

**Цопа Н.В.**, советник РААСН, д.э.н., проф. (КФУ им. В.И.  
Вернадского, Симферополь);

**Чемодуров В.Т.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь);

**Чеботарев В.И.**, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

**Шаленный В.Т.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь) – руководитель раздела «Строительство»;

**Шенна С.Г.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-  
на-Дону);

**Щербаков В.И.**, д.т.н., доц. (ВГТУ, Воронеж)

## СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 15(67) – 2019

научно-технический журнал

Печатается по решению научно-технического  
совета ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
(протокол № 6 от 02.07.2019)

Координатор выпуска *И.В. Николенко*  
Редактор *Н.А. Степанцова*  
Корректор *А.Н. Нестерова*  
Верстка *Г.Р. Биленко*

Редакция Академии строительства и  
архитектуры (структурное подразделение)  
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Адрес редакции: 95006, Республика Крым,  
г. Симферополь, ул. Павленко, 3, корпус 2, к. 410,  
e-mail: rio@napks.ru

Подписан в печать 15.07.2019.

Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Гарнитура Times New Roman. Усл. -печ. л. 19,0.

Тираж 100 экз.

Издатель: федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Крымский федеральный университет имени  
**В.И. Вернадского**».

Издательство: ФГАОУ ВО «КФУ  
им. В.И. Вернадского»  
<http://cfuv.ru>, [io\\_cfu@mail.ru](mailto:io_cfu@mail.ru)  
(3652) 60-84-98,

295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект  
Академика Вернадского, 4, каб. 400Б

Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «КФУ  
им. В.И. Вернадского»  
295000, Республика Крым, г. Симферополь, бульвар  
Ленина, 5/7

Распространяется по подписке.

Подписка по каталогу агентства «Роспечать».

Подписной индекс: 64974 (полугодовая).

Стоимость 1 экз. журнала 227,0 руб.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **Раздел 1. Градостроительство**

- Шейна С. Г., Гиря Л. В., Буракова А. А., Горская А. Л.**  
МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПАМЯТНИКОВ  
АРХИТЕКТУРЫ 7
- Казьмина А. И., Корой Е. И.**  
ПРОБЛЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КУРОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С РЕШЕНИЕМ  
ПРАВИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМЕЮЩЕЙСЯ ПРИРОДНОЙ И  
СОЗДАВАЕМОЙ ИСКУССТВЕННОЙ СРЕДЫ 15
- Скуратов С. В., Скидан А. А., Кеворков А. Э.**  
РАСЧЕТ ТРЕУГОЛЬНЫХ ОБШИВОК МНОГОГРАННЫХ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ 21
- Латышев С. С., Тищенко И. В., Дронова А. В.**  
ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛИДЫ ДЮПЕНА НА  
ПРИМЕРЕ КУЛАЧКОВОГО ЗАЖИМА 25
- Живица В. В.**  
МУЗЕЕФИКАЦИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ В ЧЕРТЕ ГОРОДА 37

### **Раздел 2. Строительство**

- Румянцева В. Е., Гоглев И. Н., Логинова С. А.**  
ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КАРБОНИЗАЦИИ, ХЛОРИДНОЙ И СУЛЬФАТНОЙ КОРРОЗИИ  
ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ 51
- Дьяков И. М., Дьяков А. И., Дьякова Ю. И.**  
ПРОБЛЕМЫ ОДНОСТОРОННЕГО УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ  
НЕБОЛЬШОЙ ЭТАЖНОСТИ 59
- Любомирский Н. В., Николаенко В. В., Николаенко Е. Ю.**  
ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
КАРБОНАТНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВО-ИЗВЕСТНЯКОВЫХ  
СИСТЕМ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ 67
- Шаленный В. Т., Головченко И., Щегула Р.**  
ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА  
РЕКОНСТРУКЦИОННЫХ И ЛИКВИДАЦИОННЫХ РАБОТ АЛМАЗНЫМ ДИСКОВЫМ  
ОБОРУДОВАНИЕМ 77
- Грушко И. С., Скибин Г., Дружинина Е.**  
ОБОСНОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА (ПЕНОСТЕКЛА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ 87
- Борисенко Ю. Г., Рудак С. В.**  
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЛЕГКИХ ПОРИСТЫХ  
ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ 101

### **Раздел 3. Инженерное обеспечение**

<b>Зиганишин А.М., Батрова К.Э., Гимадиева Г.А., Логачев К.И., Аверкова О.А.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	111
<b>Чичерин С. В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	125
<b>Аметов Ф.Р., Бекиров Э.А.</b> ПРИЧИННЫЙ АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ УЯЗВИМОСТЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И СБОРА ДАННЫХ SCADA	135
<b>Кувшинов В.В., Бекиров Э.А.</b> ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	141
<b>Муровский С.П., Сокут Л.Д.</b> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ	149
<b>Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Крысько А.А.</b> ОБЩИЙ ПОДХОД К ПОЛИЛИНЕЙНЫМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И АППРОКСИМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ МНОГООБРАЗИЙ	159
<b>Первов А.Г., Андрианов А.П., Головесов В.</b> СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПРЕСНЕНИЮ МОРСКОЙ И ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ: СОКРАЩЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ И УТИЛИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАТОВ.	169
<b>Федюшко Ю.М.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНО - ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В СВИНАРНИКЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОДЕРЖАНИЯ ЖИВОТНЫХ	189
<b>Быков М.А., Бекиров Э.А., Мазинов А.С., Шевченко А.И.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АМОРФНЫМИ ФОТОПРЕОБРАЗУЮЩИМИ СТРУКТУРАМИ	193

### **Раздел 4. Экологическая безопасность**

<b>В.В. Рыкова</b> ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МАССИВОВ ЗАРУБЕЖНЫХ И РОССИЙСКИХ БАЗ ДАННЫХ	199
<b>Список авторов</b>	209
<b>Руководство для авторов</b>	211

## **CONTENT**

### **Section 1. Town planning**

<i>Sheina S. G., Giria L. V., Burakova A. A., Gorskaya A. L.</i> THE METHODOLOGY OF COMPLEX ASSESSMENT OF THE STATE OF MONUMENTS	7
<i>Kazmina A. I., Koroy E. I.</i> THE PROBLEM OF RECONSTRUCTION OF RESORT COMPLEXES WITH THE DECISION OF PROPER COMMUNICATION BETWEEN THE NATURAL AND THE ARTIFICIAL ENVIRONMENT	15
<i>Skuratov S. V., Skidan A. A., Kevorkov A. E.</i> CALCULATION TRIANGULAR MESH LININGS MULTIFACETED DOMES	21
<i>Latyshev S. S., Tishchenko I.V., Dronova A.V.</i> OPPORTUNITIES OF COMPUTER MODELLING DUPIN CYCLIDE ASACAMLOCK	25
<i>Jivitsa V.V.</i> THE MUSEUMIFICATION OF ARCHAEOLOGICAL MONUMENTS IN THE CITY	37

### **Section 2. Construction**

<i>Rumyantseva V. E., Gogolev I. N., Loginova S. A.</i> THE USE OF FIELD AND LABORATORY METHODS FOR THE DETERMINATION OF CARBONATION, CHLORIDE AND SULPHATE CORROSION THE EXAMINATION OF BUILDING STRUCTURES	51
<i>Dyakov I. M., Dyakov A. I., Dyakova Yu. I.</i> PROBLEMS OF THE UNILATERAL STRENGTHENING OF FOUNDATIONS OF BUILDINGS LOW RISE	59
<i>Lubomirsky N. V., Nikolaenko V. V., Nikolaenko E. Yu.</i> CHANGE OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS CARBONATE OF HARDENING BASED ON LIME-LIMESTONE SYSTEMS OVER TIME	67
<i>Shalenny V.T., Golovchenko I., Shegula R.</i> IMPROVING THE SAFETY AND EFFICIENCY OF THE RECONSTRUCTION AND LIQUIDATION WORKS DIAMOND DISC EQUIPMENT	77
<i>Grushko I., Skibin G., Druzhinina E.</i> SUBSTANTIATION AND DESIGN OF COMPOSITIONS OF HEAT-INSULATING MATERIAL (FOAM GLASS) USING RECYCLABLE RESOURCES	87
<i>Y.G. Borisenko, S.V. Rudak</i> INFLUENCE OF CONTENT AND GRAIN COMPOSITION OF LIGHT POROUS FILLERS ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF BITUMINOMERAL COMPOSITIONS	101

### **Section 3. Engineering Support**

<i>Ziganshin, A. M., K. E. Batrova, Gimadeeva G. A., Logachev K. I., Averkova O. A.</i> THE ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION SYSTEMS BY PROFILING SHAPED ELEMENTS	111
---	-----

<b><i>Chicherin S. V.</i></b> THE STUDY OF THE CAUSES OF HYDRAULIC FAILURE MODES AND THE OCCURRENCE OF TRANSIENTS IN DISTRICT HEATING SYSTEMS	125
<b><i>Ametov F. R., Bekirov E. A.</i></b> CAUSAL ANALYSIS OF CRITICAL VULNERABILITIES OF CONTROL AND DATA ACQUISITION SCADA	135
<b><i>Kuvshinov V. V., Bekirov E. A.</i></b> TEPLOPOSTOCHANYA INSTALLATION FOR THE COMBINED PRODUCTION OF THERMAL AND ELECTRIC ENERGY	141
<b><i>Murawski S. P., L. D. Sokut</i></b> PERSPECTIVE DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF SOLAR POWER PLANTS OF THE REPUBLIC OF CRIMEA	149
<b><i>Konopatskiy E.V., Rotkov S.I., Krysko A.A.</i></b> A GENERAL APPROACH TO MULTILINEAR INTERPOLATION AND APPROXIMATION BASED ON LINEAR MANIFOLDS	159
<b><i>Fediushko Y.M.</i></b> STUDY OF THE INFLUENCE OF DYNAMICS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY REGIMES IN THE PIG ON THE TECHNOLOGICAL ANIMAL CONTENTS	169
<b><i>Pervov A.G., Andrianov A.P., Golovesov V.A.</i></b> MODERN SOLUTIONS TO DESALINATE SEA AND WELLWATER TO REDUCE POWER CONSUMPTION AND CONCENTRATE UTILIZATION	189
<b><i>Bykov M.A., Bekirov E.A., Mazinov A.S., Shevchenko A.I.</i></b> RESEARCH OF THE INTERACTION OF QUANTUM RADIATION WITH AMORPHIC PHOTO TRANSFORMING STRUCTURES	193

#### **Section 4. Environmental safety**

<b><i>Rykova V.V.</i></b> GEOTECHNICAL MONITORING: ANALYSIS OF DATA OF RUSSIAN AND FOREIGN DATABASES	199
<b><i>List of authors</i></b>	209
<b><i>Authors Guide</i></b>	211

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

Шейна С. Г., Гирия Л. В., Буракова А. А., Горская А. Л.

Донской государственный технический университет (ДГТУ),  
344000, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, rgsu-gsh@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье предложена методика комплексной оценки памятников архитектуры. На примере Екатерининской женской гимназии (ныне МБОУ Лицей № 13), на основании которой проведена оценка технического состояния, оценка историко-культурной, градостроительной и архитектурно-эстетической ценности, экономическая оценка, суть каждого из модулей полностью раскрыта. Статья подкреплена расчетом, из которого становится понятно, что реставрация памятников требует колоссальных затрат, но тем не менее, реставрация необходима, так как памятники архитектуры составляют культурное наследие нашей страны.

**Предмет исследования:** Описание методики комплексной оценки состояния памятников архитектуры

**Материалы и методы:** Метод комплексной оценки состояния памятников архитектуры

**Результаты:** Оценка стоимости объекта исследования

**Выводы:** Выполнение комплексной оценки состояния памятников архитектуры на примере Екатерининской женской гимназии (ныне МБОУ Лицей № 13)

**Ключевые слова:** техническое состояние, экономическая оценка, памятник архитектуры

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальна задача по сохранению памятников архитектуры, так как состояние их с каждым годом из-за недоремонта ветшает. Основным законом является Федеральный закон «Об объектах культурного наследия народов Российской Федерации», он обозначил основные принципы, связанные с охраной и сохранением памятников культурного наследия [1]. Так, например в Ростове-на-Дону, в 2008 г. были приняты, а в 2012 г. обновлены «Правила застройки и землепользования», в составе которых были выделены зоны с особыми условиями использования территорий, в части охраны объектов культурного наследия, которые вошли в 488 объектов культурного наследия, из которых количество существующих памятников истории и культуры регионального значения – 338, выявленных памятников истории и культуры – 133, памятников истории и культуры федерального значения – 17 на 1 января 2018 года [2]. В настоящее время многие из памятников архитектуры являются жилым фондом и находятся в неудовлетворительном состоянии.

На основании имеющейся на данный момент информации о памятниках истории и культуры, основным направлением, требующим внимания, является сохранение, реставрация их надлежащий ремонт памятников архитектуры. Не смотря на техническое обслуживание, реставрация и ремонт памятников должны представлять собой непрерывный процесс, реализацию комплекса мер по уходу и поддержанию всех видов ремонта, объекта в целом, в исправном состоянии в течение всего срока службы. В противном случае общее техническое состояние ухудшается и вместе с этим увеличивается физический износ. Для проведения качественных реставрационных и ремонтных работ, требуется выделение огромных средств не только из

федерального бюджета, но и из регионального, что представляет собой проблему, а значит, может грозить невозможной их утратой [3].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Здания памятников архитектуры – специализированный вид недвижимости, определение стоимости которых требует комплексной оценки, которая включает в себя (рисунок 1):

- оценку технического состояния;
- оценку историко-культурной, градостроительной и архитектурно-эстетической ценности здания-памятника;
- экономическую оценку.

Комплексная оценка, как было указано выше, состоит из трёх модулей.

**МОДУЛЬ 1** «Оценка технического состояния памятника архитектуры» включает в себя:

- обследование несущих и ограждающих конструкций, включая определение конструктивного выполнения, характеристик материалов и несущей способности;

- материаловедческие исследования, то есть определение физических, физико-химических, физико-механических характеристик материалов и их повреждений.

**МОДУЛЬ 2** «Оценка историко-культурной, градостроительной и архитектурно-эстетической ценности» учитывает: целостность, сохранность, подлинность, значимость и своеобразие объекта, систему планировки, рассматривает объект исследования со всех сторон.

**МОДУЛЬ 3** «Экономическая оценка» основана на данных технической и историко-культурной оценок. Учитывает все параметры инвестирования, прогнозирует увеличение физического износа и определяет стоимость объекта.

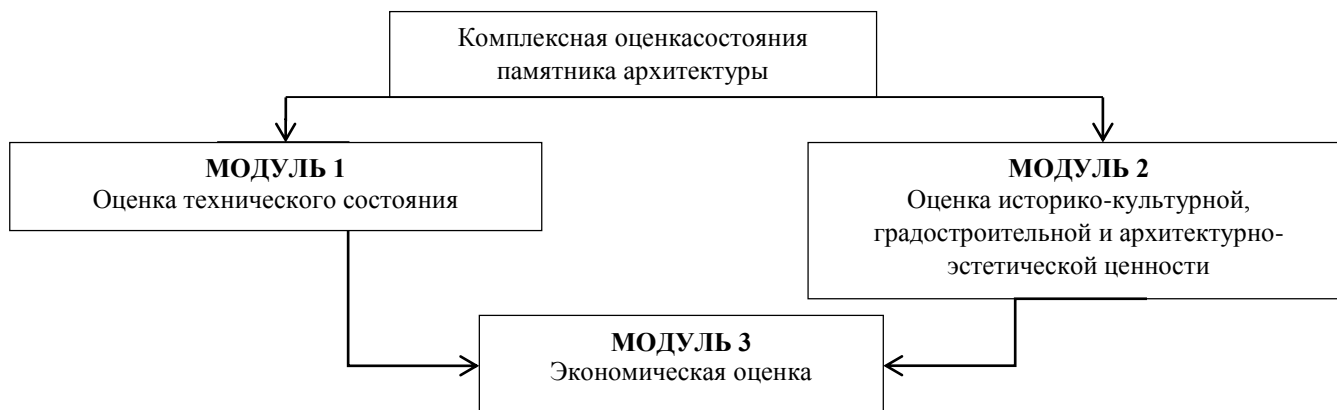


Рис. 1. Комплексная оценка состояния памятника архитектуры

Fig. 1 Comprehensive assessment of the state of the monument of architecture

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В целях выполнения реставрационных работ, было выполнено обследование здания Екатерининской женской гимназии (ныне МБОУ Лицей № 13).


В результате проведенного обследования объекта определено техническое состояние конструктивных элементов данного объекта, в результате чего был составлен акт обследования,





разработанный на основании ВСН 53-86(р), создана дефектная ведомость (табл.1). А также выполнена компьютерная модель здания (рис.2). Она является информационной моделью исследуемого здания, является основанием для необходимых расчетов и получения рабочей документации.

Было установлено, что здание по адресу: пл. Свободы 1/1 находится в неудовлетворительном состоянии (физический износ здания составляет 52,81%). Появление выявленных разрушений явилось причиной неблагоприятной экологической и геологической ситуацией на территории памятника архитектуры, а также неправильной эксплуатацией[6].

Таблица 1. Дефектная ведомость здания Лицея № 13.

Table. 1. Defective list of the lyceum building №13

№ п/п	Дефект	Фото
1	Отслоение штукатурного слоя и следы увлажнения в цоколе здания	

№ п/п	Дефект	Фото
2	Отслоение и отпадение штукатурного слоя на карнизной плите	
3	Трещины шириной раскрытия до 10 мм, отслоение штукатурного слоя	
4	Отсутствие части водосточной трубы	
5	Поражение коррозией чугунных участков труб системы канализации	

№ п/п	Дефект	Фото
6	Следы увлажнения несущих конструкций кровли, протечки, просветы	



**Рис. 2** Компьютерная модель здания Лицея № 13

**Fig. 2.** Computer model of the building lyceum №13

По результатам проведенного технического обследования несущих конструкций здания для повышения эксплуатационной надежности здания необходимо провести следующие инженерные мероприятия:

1. Трещины в стенах и перегородках раскрытием до 2 мм зачеканить цементно-песчаным раствором состава 1:2, трещины раскрытием свыше 2 мм заиньецировать по существующей методике.
2. Установить лотки в отмостке для стока атмосферных вод.
3. Выполнить ремонт лестничных клеток, ступеней и отделки мест общего пользования.
4. Произвести замену стальных участков труб системы отопления.
5. Произвести замену стальных участков труб системы холодного водоснабжения.
6. Произвести модернизацию системы электроснабжения.
7. Выполнить частичную замену оконных и дверных проемов.
8. Произвести частичную замену паркетного покрытия пола.
9. Полная замена кровли и ее несущих конструкций.

### Экономическая оценка

Оценка памятника – расчет стоимости недвижимости. Для того, чтобы расчет был произведен необходимо иметь как традиционные знания в этой сфере, так и знания в сфере строительства. При оценке стоимости объекта необходимо также определить перечень затрат на их выполнение. Памятники архитектуры могут быть рассмотрены с двух сторон:

1. как материальный результат труда;
2. как формы исторического и культурного наследия.

Данные аспекты определения стоимости памятника являются связующим звеном при оценке данного вида недвижимости. На основании проведенного технического обследования можно сделать вывод о том, что при оценке памятников возможно использование трех подходов – затратного, сравнительных продаж, доходного, но с внесением некоторых дополнений в каждый из подходов, то есть необходим учет их специфики, которая определяется особенностями данного типа недвижимости. Методика расчета каждого подхода представлена на рисунке 3.

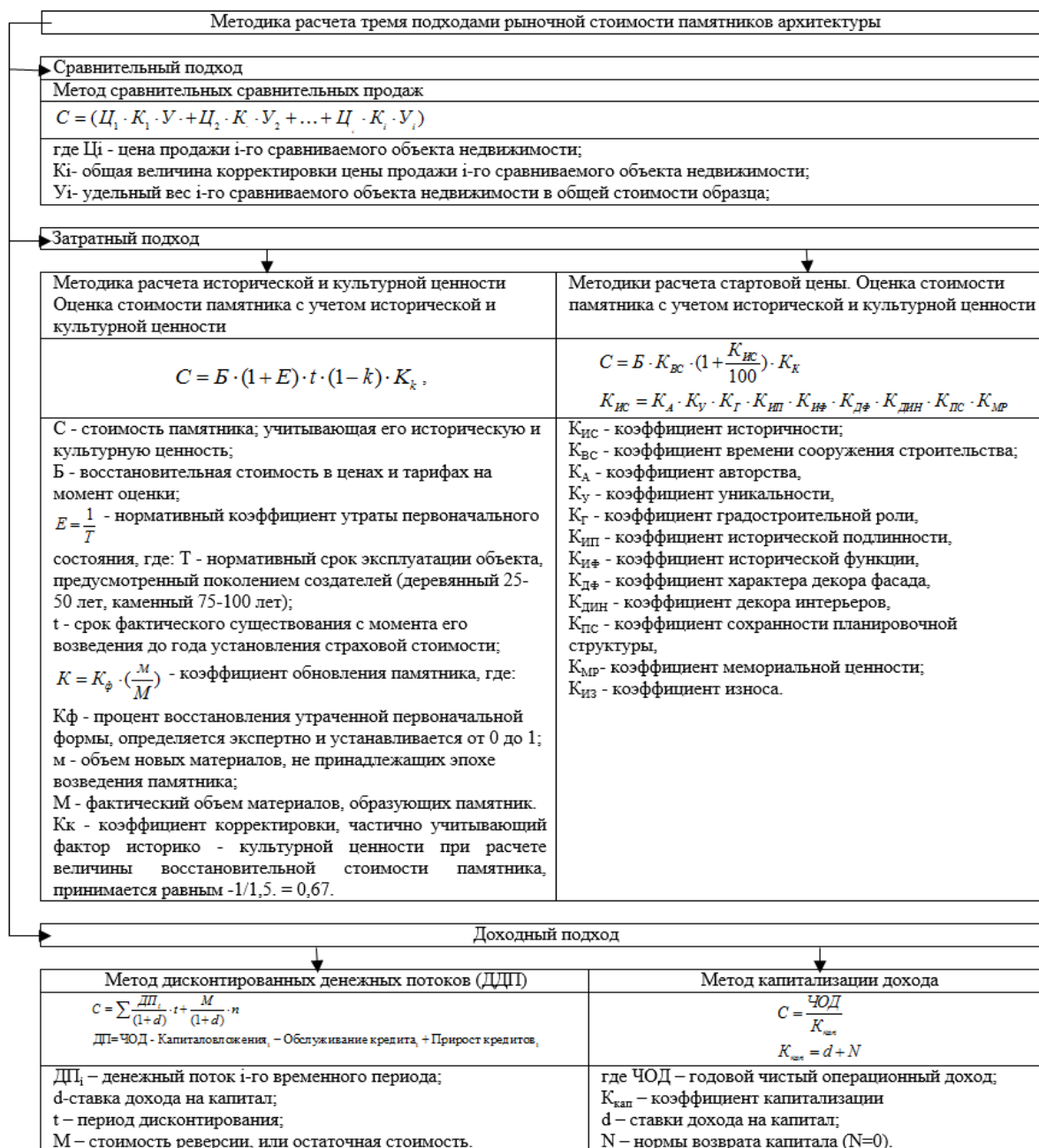


Рис. 3 Методика расчета тремя подходами памятников архитектуры

Fig. 3. Method of calculation by three approaches of architectural monuments

На рисунке 3 приводится полное описание каждого из подходов и их особенности.

Таблица 3. Описание подходов, используемых при оценке объекта исследования

Table 3. Description of the approaches used in the evaluation of the object of study

Подход	Описание	Минусы	Особенности
Доходный	Определение ожидаемых доходов от оцениваемого объекта.	Отсутствие необходимой информации о сопоставимых продажах, а извлечение дохода не является основой для инвестиций в памятники архитектуры.	Исследование факторов, влияние которых способствуют уменьшению величины чистого операционного дохода за счёт расходов по его сохранению. Вследствие чего под действием фактора историко-культурной ценности возрастает его доходность с течением времени.

Продолжение таблицы 3

Continuation of table 3

<b>Сравнительных продаж</b>	Совокупность методов оценки стоимости объекта оценки, основанных на сравнении объекта оценки объектами – аналогами.	Недостаток информации о сделках купли – продажи объектов – аналогах.	Памятники архитектуры в связи со своей уникальностью являются несравнимыми с другими объектами недвижимости.
<b>Затратный</b>	Определение затрат на восстановление или замещение объекта недвижимости. Учет его износа.	Учёт физических, экономических и социальных факторов.	Уникальность объектов архитектуры позволяет учитывать иные способы получения дохода, то есть имеют отличия в системе единиц измерения.

Оценка стоимости памятника архитектуры была рассчитана затратным подходом, так как на основании проведенного анализа подходов оценки, затратный подход наиболее подходит для получения достоверных результатов проведенного исследования. Расчет оценки приведен ниже.

**Исходные данные:** восстановительная стоимость – 48 365 228,270 млн. руб.;  $t = 150$  лет;  $E = 0,01$ ;  $K = 0,8 \cdot 0,2 = 0,16$ ;  $t(1-k) = 150(1 - 0,16) = 126$  лет.

Результат расчета: оценка стоимости с учетом исторической и культурной ценности составляет -  $C = 48,365 \cdot (1 + 0,01) \cdot 126 \cdot 0,68$

$C = 4123,8$  млн.руб.

Согласно проведенной экономической оценке, можно сделать вывод о том, что стоимость здания памятника значительно превышает его восстановительную стоимость. Данный результат говорит о целесообразности восстановления памятника архитектуры несмотря на большие затраты.

## ВЫВОД

На основании проведенной комплексной оценки можно прийти к выводу о том, что памятники архитектуры – объекты, требующие внушительное количества денежных средств на восстановление и поддержание работоспособного состояния. Как говорилось ранее, памятники архитектуры являются уникальными объектами, единственными в своём роде, поэтому их восстановление необходимо, так как они являются достоянием страны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. От 13.07.2015) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».
2. Постановление Правительства РФ от 5 июля 2002 г. № 504 «Об общероссийском мониторинге состояния и использования памятников истории и культуры, предметов музейного фонда Российской Федерации, а также кинофонда».
3. О реализации положений Федерального закона «Об объектах культурного наследия

(памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» в части подготовки проекта закона Российской Федерации «Об отнесении находящихся в государственной собственности объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации к федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации и муниципальной собственности»: постановление правительство Москвы от 27 января 2004 года № 28-пп.

4. Шеина С. Г., Бабенко Л. Л., Шумеев П. А. Разработка информационно-аналитического сопровождения системы градозащитного обеспечения сохранения исторической застройки при реконструкции городских территорий. Интернет – журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», №5, (2013).

5. Шеина С. Г., Упенников Д.К. Современные технологии, приборы и оборудования для трёхмерного моделирования памятников архитектурного наследия. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», Том 7, №3, (2015)

6. Свод реставрационных правил. «Рекомендации по проведению научно-исследовательских, изыскательских, проектных и производственных работ, направленных на сохранение объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации». СПб-2007.

7. Svetlana Sheina, Lidia Giryа, Anastasia Lapina Use of ground surface deformations monitoring data for control of housing facilities health // MATEC Web of Conferences Volume 106 (2017) International Science Conference SPbWOSCE-2016 “SMART City”

URL: [matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/20/contents/contents.html](http://matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/20/contents/contents.html).

8. Шеина С.Г., Хамавова А.А., Исмагулаева Н.А. Комфортная среда жизнедеятельности: новые стандарты устойчивого развития сельских территорий // Инженерный вестник Дона. 2015. №3 (37). С. 88 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3123)

9. Петров К.С., Колесников И.А. Современные аспекты формирования комфортной городской среды // Инновации в науке. 2016. №9 (58). С. 98-102.

10. Справочник расчетных данных для оценки. СРД-2. М.: ООО «НПЦПО»; Вею-принт, 2008.

11. Методика оценки зданий – памятников культурного наследия. М.: ООО «НПЦПО», 2004, 2008. URL: [www.cpcpa.ru](http://www.cpcpa.ru)

## REFERENCES

1. Federal Law of June 25, 2002 No. 73-FZ (as amended on July 13, 2015) "On Objects of Cultural Heritage (Monuments of History and Culture) of the Peoples of the Russian Federation".

2. Decree of the Government of the Russian Federation of July 5, 2002 No. 504 "On All-Russian Monitoring of the Condition and Use of Monuments of History and Culture, Objects of the Museum Fund of the Russian Federation, and also the Film Fund".

3. On the implementation of the provisions of the Federal Law "On Objects of Cultural Heritage (Historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation" regarding the preparation of the draft law of the Russian Federation "On the assignment of state-owned cultural heritage objects (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation to the Federal property, property of constituent entities of the Russian Federation and municipal property": Resolution of the Moscow Government of January 27, 2004 No. 28-pp.

4. Sheina S. G., Babenko L. L., Shumeev P. A. Development of information and analytical support for the system of urban ecological support for the preservation of historical buildings during the reconstruction of urban areas. Internet journal "SCIENCE", №5, (2013).

5. Sheina S. G., Upennikov D.K. Modern technologies, instruments and equipment for three-dimensional modeling of monuments of architectural heritage. Internet journal "SCIENCE", Volume 7, No. 3, (2015)

6. Code of restoration rules. "Recommendations for research, survey, design and production work aimed at preserving cultural heritage objects (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation." PSA 2007.

7. Svetlana Sheina, Lidia Girya, Anastasia Lapina Use of ground surface deformations monitoring data for control of housing facilities health // MATEC Web of Conferences and Volume 106 (2017) International Science Conference SPbWOSCE-2016 "SMART City"

URL: [matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/contents/contents.html](http://matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/contents/contents.html).

8. Sheina S.G., Khamavova A.A., Ismatulaeva N.A. Comfortable living environment: new standards for sustainable development of rural areas // Engineering Bulletin of the Don. 2015. No3 (37). S. 88 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3123)

9. Petrov K.S., Kolesnikov I.A. Modern aspects of the formation of a comfortable urban environment // Innovations in science. 2016. No9 (58). S. 98-102.

10. Reference book of calculated data for evaluation. SRD-2. М.: LLC "NPTsPO"; Veyu-print, 2008.

11. Methodology for the assessment of buildings - monuments of cultural heritage. М.: LLC "NPTsPO", 2004, 2008. URL: [www.cpcpa.ru](http://www.cpcpa.ru)

## THE METHODOLOGY OF COMPLEX ASSESSMENT OF THE STATE OF MONUMENTS

Sheina S. G., Girya L. V., Burakova A. A., Gorskaya A. L.

**Summary.** This article proposes a method of complex assessment of architectural monuments. On the example of the Catherine women's gymnasium (now MBOU Lyceum № 13), based on which the assessment of the technical condition, the assessment of historical and cultural, urban planning and architectural and aesthetic value, economic assessment, the essence of each of the modules is fully disclosed. The article is supported by the calculation, from which it becomes clear that the restoration of monuments requires enormous costs, but nevertheless, the restoration is necessary, since the monuments of architecture constitute the cultural heritage of our country.

**Subject of research:** Description of the method of complex assessment of the state of architectural monuments

**Materials and methods:** Method of complex assessment of architectural monuments

**Results:** Valuation of the research object

**Conclusions:** A comprehensive assessment of the state of architectural monuments on the example of the Catherine women's gymnasium (now MBOU Lyceum № 13)

**Key words:** technical condition, economic assessment, architectural monument



УДК 728

## ПРОБЛЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КУРОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С РЕШЕНИЕМ ПРАВИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМЕЮЩЕЙСЯ ПРИРОДНОЙ И СОЗДАВАЕМОЙ ИСКУССТВЕННОЙ СРЕДЫ

А. И. Казьмина, Е.И. Корой

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И Вернадского Академия строительства и архитектуры» г. Симферополь, РФ

E-mail: kazmina.albina@yandex.ru, geka-koroi@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы предпроектных исследований до начала реконструкции санитарно-курортных комплексов Черноморского побережья, основные фонды и медицинские базы которых имеют износ на 70-90% (В Республики Крым из 188 здравниц, находящихся в собственности Российской Федерации и государственной собственности республики Крым, нуждается в модернизации и реконструкции не менее 107 здравниц, с ориентировочной общей стоимостью работ по реконструкции и модернизации от 18 млрд. руб.

**Ключевые слова:** природная среда, планировочная организация курорта, урбанизация искусственной среды, ландшафт.

### ВВЕДЕНИЕ

Реконструкции городов одна из наиболее сложных социальных и градостроительных проблем, которые должны осуществляться на основе комплекса предпроектных исследований с решением экономических, культурно-исторических и архитектурно-планировочных задач.

Влияние на планировку и архитектурную композицию элементов природно-пространственной среды в проектах выражается по-разному. Особенно видно на примерах развития курортных городов. Реконструкция многих черноморских курортов сочетается с развитием их на свободных территориях путем организации новых курортных и жилых районов.

При этом возникает возможность более экономично использовать территории курортных комплексов, благодаря их компактной организации, что позволит увеличить территории общекурортного пользования и создать крупные парки, приморские бульвары и достаточные ландшафтные разрывы между комплексами.

Вопросы реконструкции необходимо решать также при рассмотрении городов-курортов, формирование которых вытекает из концепции групповых систем расселения.

Отличительная особенность курортной застройки по сравнению с городскими ансамблями тесный контакт рекреационных объектов с окружающей природной средой.

Новые направления в планировке и застройке курортов вызывают необходимость уточнения градостроительной классификации курортных образований. Отсутствие единой терминологии в области курортного градостроительства, вызывает неясность их положение в структуре курортов.

Так, например, представленная программа имеет название «Государственная программа развития

курортов и туризма в республике Крым» и далее по тексту «основной целью настоящей Государственной программы является формирование современного туристско-рекреационного комплекса, характеризующегося конкурентной способностью, востребованностью, разнообразием предлагаемых туристических и лечебно-оздоровительных услуг».

Однако, в сфере туризма в настоящее время установлены следующие нормативные правовые акты.

1. Государственная программа Российской Федерации «Развития культуры и туризма на 2013-2020 годы от 15.04.2014 № 317;

2. Закон Республики Крым от 14.09.2011 № 51-ЗРК «О туристической деятельности в Республике Крым».

3. Закон Республики Крым от 28.01.2015 № 76-ЗРК/2015 «О курортах, природных лечебных ресурсах и лечебно-оздоровительных местностях Республики Крым».

Такая классификация законов дала нам возможность предложить разделение с учетом выполнения функций по нормативно-правовому регулированию, функциональным процессам и контролю в санитарно-курортной и туристической отраслях.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Решение проблемы создания крупных курортных комплексов во многом зависит и от состояния научных исследований в этой области. ЦНИИ курортологии и физиотерапии занимаются курортными ресурсами страны, ведет работу по формированию структуры курортов. Ведущим институтом в области формирования и размещения курортов был Киев НИИП градостроительства,

который также координировал работу всех институтов на предмет развития курортов.

Потребность в территориях для целей отдыха на перспективу с учетом природных парков, заповедников и заказников, в 6-7 раз превосходит потребности в территориях для жилой застройки. Этим вопросам уделили внимание архитекторы Мелик-Пашаев А.И., Журавлева Н.П., Петухова А.И. и другие, они предложили разработки новых планировочных и технических решений, с помощью которых возможна эффективная компенсация дефицита естественных пляжей (акваториальный рекреационный комплекс). В 1975г. утвержден разработанный Киев НИИП градостроительства генеральный план курортного района Большая Ялта протяженностью вдоль моря 70 км.

При разработке генеральных планов реконструкции городов-курортов необходимо учитывать, что города по мере своего территориального роста оказываются в рельефных ситуациях отличных от тех, в которых они первоначально возникли.

### **ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Методы реконструкции морально и физически устаревших зданий (курортных и жилых) должны быть дифференцированы в зависимости от условий родственных групп городов-курортов (на примере курортов Республики Крым).

До начала реконструкции необходимо: классификация курортов; мониторинг оценки критериев и факторов, определяющих надежность и безопасность среды, в которой находятся люди; микроклимат, освещение, инсоляция, рекомендации по развитию архитектурной типологии градостроительных решений и конструктивных систем более надежных в эксплуатации зданий.

Интенсификация использования курортных территорий должна сочетаться с максимальным сохранением естественной природной среды и созданием охраняемых ландшафтов.

До начала реконструкции необходимо наличие климатических паспортов местности.

Необходимо выявить средство обновления старой застройки на основе учета минимальных потерь ценного в техническом и архитектурном отношениях зданий в условиях каждого курорта.

Проведя предпроектные исследования, необходимо разработать детальный проект реконструкции адресного курорта.

В проведении подобных мер будут заинтересованы и другие курортные районы.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

За многовековую историю существования человечество затратило огромную энергию, чтобы поставить на службу своим интересам природу.

Природа, вторгаясь в города, вносила в их облик неповторимые черты. Это касается и городов Крыма.

Создания крупных курортных комплексов в Крыму послужило своеобразной защитной, градостроительной реакцией на урбанизацию природной среды.

В ряде исследований выявлено, что первоначально сложившаяся практика застройки прибрежных территорий Крыма в дальнейшем повлияла на принципы формирования планировочной организации курортов.

При разработке новых генеральных планов делались попытки ее усовершенствования с упорядочиванием размещения жилья, коммунально-промышленных объектов, выделением функциональных зон, улучшением транспортной системы. Однако, все размещения здравниц осталось прежним.

Генеральный план курортного района, Большая Ялта был разработан Киев НИИП градостроительства в 1974 году. (рис.1)

Протяженность вдоль моря составляет 70 км от мыса Сарыч до Медведь горы. Генеральный план большой Ялты в большей степени отвечал задаче формирования курортного района, как единой градостроительной системе.

Однако, большая часть территории города Ялта отведена под жилищное строительство, в то время как курортная зона получала незначительное развитие. В генеральном плане не были разработаны предложения по дальнейшему территориальному развитию города с учетом возрастающей численности населения.

Существенные ошибки были допущены при прогнозировании пляжных ресурсов, которые во многом определяют возможности развития приморских курортов.

Генеральные планы разрабатывались без реальной оценки перспективных пляжных ресурсов, что порождало серьезные ошибки при расчете вместимости курортов и формировании их планировочной структуры.

Так, например, в основу генерального плана Большой Ялты первоначально были заложены ошибочные расчеты о возможности увеличения ширины пляжей по всему побережью (70 км) до 25 м. А на самом деле возможность организации пляжей в Ялте крайне ограничена.

Множество таких примеров можно наблюдать в западной части Южного берега Крыма.

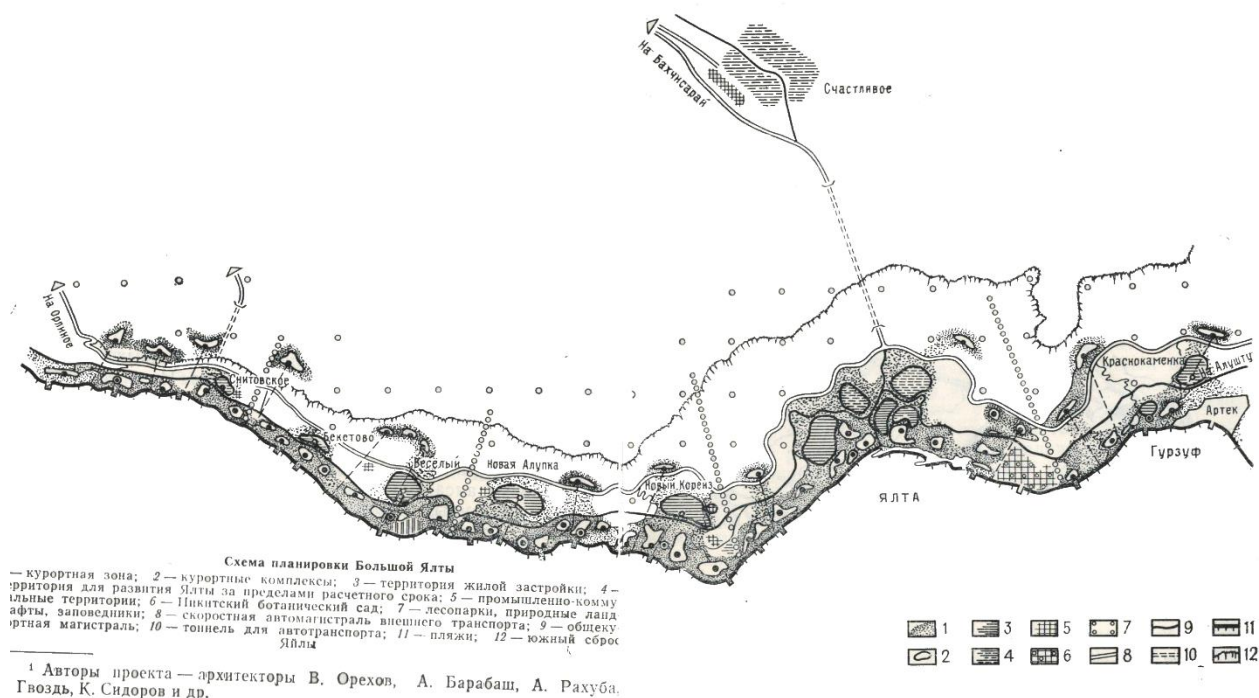


Рис. 1. Генеральный план Большой Ялты

Fig. 1. General plan of Big Yalta

Отрицательным моментом в ранее разработанных генеральных планах курортов является исторически сложившаяся практика линейного размещения участков здравниц узкой полосой вдоль побережья, поэтому многие из них размещаются на оползневых и других трудных в освоении территориях, в то время, как рядом расположены участки, где зеленые насаждения размещены в не оползневых зонах.

Учитывая, что каждый курорт имеет свои индивидуальные характеристики, поэтому и реконструкции таких курортов будут носить индивидуальный характер.

Реконструкция курорта-одна из наиболее сложных социальных и градостроительных задач.

В процессе реконструкции должны быть найдены решения по развитию и преобразованию планировочной структуры курортов, переустройству курортных центров, перестройки или модернизации старых кварталов застройки в городах-курортах, преобразования транспортных магистралей и охрана природной среды.

Для начала реконструкции необходимо выполнить предпроектные исследования:

- уточнить классификацию курортно-лечебных комплексов;
- установить критерии соответствия условий проживания на исторически сложившихся курортах и выполнить мониторинг среды проживания отдыхающих в существующих зданиях;
- необходима разработка метода вариантного поиска с учетом: градостроительной оценки территории курорта, планировочной

структуры курорта. Градостроительная оценка включает: инженерно-строительный анализ территории, анализ существующих зеленых насаждений, анализ территории с учетом определения благоприятных и менее благоприятных условий; схему функционального зонирования территории. Планировочная структура курорта включает: схему архитектурно-планировочной структуры курорта, схему озеленения, схему транспортных и пешеходных связей и схему культурно-бытового обслуживания;

- соответствие ландшафта территории ранее проектируемому ландшафту;
- анализ и оценка природных факторов;
- данные о ландшафтно-эстетической организации и ландшафтно-строительном зонировании территории курорта;
- комплексная оценка природных условий.

Одной из главных задач преобразования планировочной структуры сложившихся курортов является проведение четкого функционального зонирования территории с ликвидацией чересполосного размещения курортной, жилой застройки и коммунальных объектов.

Несмотря на то, что реконструкция каждого курорта, входящего в систему, носит индивидуальный характер, это система должна рассматриваться как гибкое планировочное образование, части которого связаны между собой и способны развиваться и изменяться в соответствии с развитием всего курортного района.

## ВЫВОДЫ

1. Разделение санаторно-курортной и туристической отрасли с учетом выполнения функции по нормативно-правовому регулированию, функциональным процессам и контролю в этих отраслях

2. Для определения объема реконструкции курортных районов необходимо выполнить предпроектные работы.

3. Для решения многих вопросов, связанных с выполнением реконструкции курортных районов необходимо проведение серьезных научных исследований.

4. Использование принципов планировки курортов в условиях реконструкции города-курорта в расширенных границах

5. При реконструкции необходим учет соразмерности масштаба зданий и окружающей природной среды. В этом одна из особенностей определения масштабности застройки в курортных районах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Совета Министров Республики Крым от 29 декабря 2016г. №650 об утверждении государственной программы развития курортов и туризма в Республике Крым на 2017-220 годы.

2. Рекомендации по описанию климата большого города. Часть IV. Показатели теплового состояния человека и характеристика биоклимата городской среды. Подготовил Б.А. Айзенштат. -Л., 1978.-66с.

3. Казьмина А.И., Корой Е.И. Энергетический потенциал климата района строительства и условия для саморегулирования теплового режима территории

В сборнике: **НОВАЯ НАУКА: ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ** сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017. С. 169-174.

4. Казьмина А.И., Корой Е.И. Методы архитектурно – строительных решений и тепловая эффективность зданий в сборнике: **Современные концепции развития науки** Сборник статей Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Сукиасян Асатур Альбертович. 2017. С. 180-188.

5. Казьмина А.И., Корой Е.И. Взаимосвязь предпроектных исследований и характера комплексной реконструкции жилых зданий **Вестник науки и образования Северо-Запада России.** 2015. Т. 1. № -4. С. 32-39.

6. Развитие города, 2005. Сб. Науч. Тр. / Под редакцией проф. Киевского Л.В. – М.: АРГУС, 234

7. Биркая К. Строительно-климатическое микрорайонирование – предпосылка для застройки городов/ Сб. науч. Тр. №6 – Вып.2. – Тбилиси, 1973. – С. 71-76.

8. Методика реконструкции жилых кварталов в центральной части Ленинграда 1980г.

9. Ионов И.И. Градостроительные проблемы Черноморских курортов Москва Стройиздат 1979.- С. 127.

10. Стаускас В.П. Градостроительная организация районов и центров отдыха Ленинград 1977. –С. 156

## REFERENCES

1. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea of December 29, 2016. №650 on approval of the state program of development of resorts and tourism in the Republic of Crimea for 2017-220.

2. Recommendations for the description of the climate of the big city. Part IV. Indicators of human thermal condition and characteristics of bioclimate of the urban environment. Prepared By B. A. Eisenstadt. - L., 1978.-66с.

3. Kazmina A. I., Koroy E. I. Energy potential of the climate of the construction area and conditions for self-regulation of the thermal regime of the territory

In the collection: **a NEW SCIENCE: the HISTORY of FORMATION, current STATE, prospects of DEVELOPMENT** of a collection of articles of International scientific-practical conference. 2017. P. 169-174.

4. Kazmina A. I., Koroy E. I. Methods of architectural and construction solutions and thermal efficiency of buildings in the collection: **Modern concepts of development of science** Collection of articles of the International scientific and practical conference. Responsible editor Sukiasyan Asatur Albertovich. 2017. P. 180-188.

5. Kazmin A. I., Cora E. I. Relationship of pre-project studies and the nature of complex reconstruction of residential buildings **Bulletin of science and education of North-West Russia.** 2015. Vol.1. No. -4. P. 32-39.

6. City development, 2005. Sat. Science. Tr. / Edited by Professor L. V. Kiev – Moscow: ARGUS, 234

7. Berka K. Construction-climatic mikroraionirovanie – a prerequisite for the development of cities/ Sat. scientific. Tr. No. 6 – Issue.2. – Tbilisi, 1973. – P. 71-76.

8. Methods of reconstruction of residential areas in the Central part of Leningrad 1980.

9. Ionov I. I. town-Planning problems of the black Sea resorts Moscow Stroyizdat 1979.- P. 127.

10. Stauskas, V. P. of the Urban organization areas and leisure centres, Leningrad 1977. –P. 156.

PROBLEMS OF RECONSTRUCTION OF RESORT COMPLEXES WITH DECISION  
OF THE CORRECT INTERACTION OF THE EXISTING NATURAL AND CREATED  
ARTIFICIAL ENVIRONMENT

Kazmina A.I., Koroy E.I.

**Summary** The article deals with the following issues: pre-project studies before the reconstruction of sanitary resorts of the black sea coast, fixed assets and medical bases which have a wear of 70-90% (In the Republic of Crimea of 188 resorts owned by the Russian Federation and the state property of the Republic of Crimea, in need of modernization and reconstruction of at least 107 resorts, with an estimated total cost of reconstruction and modernization of 18 billion rubles.

**Key words:** natural environment, planning organization of the resort, urbanization of artificial environment, landscape.



## РАСЧЕТ ТРЕУГОЛЬНЫХ ОБШИВОК МНОГОГРАННЫХ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ

Скуратов С.В., Скидан А.А., Кеворков А.Э.

Донской государственный технический университет (ДГТУ),  
344000, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,  
artemkevorkov@mail.; rukaf\_mdipk@mail.; .ruanton\_skid@mail.ru

**Аннотация:** Рассматриваются пространственные решетчатые конструкции, образующие на поверхности сетчатую систему. Односетчатые покрытия сферической формы представляют в виде ребристых, ребристо-кольцевых и сетчатых куполов. Проектируют купола на основе сеток с треугольными ячейками. В качестве конструкционного материала используют древесину и материалы на ее основе. Изучается опыт современного строительства пространственных покрытий в форме сетчатых куполов. Приводится построение пространственных точечных решеток икосаэдрального типа в форме 80-, 320- и 1280-гранников. Определяются типоразмеры стержней и треугольников, составляющих сферическую поверхность купола. Рассматривается конструкция треугольной панели многогранного сетчатого купола с обшивкой в виде ортотропной фанерной пластинки. Используется дифференциальное уравнение изогнутой поверхности пластинки для определения ее прогибов. Применены зависимости перехода от декартовой к треугольной системе координат. К рассмотрению принимается частный случай обшивки клеевой фанерной панели в виде равносторонней треугольной пластинки. Исследуется случай обшивки из березовой строительной фанеры, приведены значения упругих характеристик фанеры марки ФСФ. Записывается основное уравнение задачи об изгибе ортотропной пластинки в форме равностороннего треугольника с использованием метода конечных разностей. Изображается схема нанесенной на пластинку треугольной сетки, разделяющей пластинку на 144 треугольных ячейки. Получена система уравнений для внутренних точек при условии жесткого ее защемления на контуре. Решение системы уравнений реализуется выражением для прогиба центральной точки ортотропной пластинки в форме равностороннего треугольника, жестко защемленной по контуру, полученного в работах других авторов. Выполнено сравнение полученного результата с известными решениями. Сделан вывод о достаточности разбиения поверхности пластинки на 144 треугольных ячейки. Предложено для достижения более точного результата использовать сетку с разделением на 324 ячейки.

**Ключевые слова:** Купол, фанера, обшивка, ортотропный, сетка, метод конечных разностей.

**ВВЕДЕНИЕ**

В практике современного строительства наибольшее распространение получили решетчатые пространственные конструкции, образующие на поверхности сетчатую систему. Однослойные конструкции имеют криволинейную сетчатую поверхность и называются односетчатыми. Двухслойные конструкции имеют две параллельные сетчатые поверхности, соединенные между собой жесткими решетчатыми связями, они получили название – двухсетчатые. Одной из эффективных форм пространственных конструкций являются односетчатые купольные покрытия сферической формы, представляемые в виде ребристых, ребристо-кольцевых и сетчатых куполов из металла и древесины.

**АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ**

Мировой опыт проектирования и строительства показывает, что в настоящее время сетчатые купола проектируются преимущественно на основе сеток с треугольными ячейками и их разновидностями. Отечественный и зарубежный опыт куполостроения подтверждает рациональность использования односетчатых купольных покрытий сферической формы из древесины и материалов на её основе [1-5].

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Различают два метода построения схем сетчатой поверхности. В первом методе основой построения является плоская сеть, проецируемая на поверхность купола. Второй метод построения основан на последовательном членении вписанных в сферу правильных многогранников [1].

При построении конструктивных сетей многогранных куполов широкое применение получили пространственные точечные решетки икосаэдрального типа [3]. В работе [7] приведены результаты геометрических построений стрижневых систем в форме 80-, 320- и 1280-гранников, полученных в результате применения способа дублирования к исходному многограннику – икосаэдру, которые могут быть приняты за основу формообразования поверхности подъемистых, непологих полусферических куполов с плоским опорным контуром. Так, полуправильный 320-гранник характеризуется пятью типоразмерами стержней и шестью типоразмерами треугольников, составляющих сферическую поверхность купола [1].

Конструкции сборных многогранных куполов с применением древесных материалов состоят из отдельных панелей треугольного очертания, в качестве обшивок которых используется листовая строительная фанера. При выполнении раскроя фанерных листов возможны случаи различной ориентации волокон наружных шпонов по

отношению к контурным ребрам панели. Применяются также схемы раскроя, при которых волокна совпадают с направлением одной из сторон панели. При проектировании купольных покрытий рассматриваемого типа возникает необходимость расчета таких фанерных обшивок на поперечный изгиб от действия местной нагрузки. В этой связи представляет интерес задача об изгибе треугольной ортотропной пластинки.

Для определения упругих прогибов  $w$  рассмотрим ортотропную фанерную пластинку в форме косоугольного треугольника, расположенную относительно координатных осей, как показано на рис. 1.

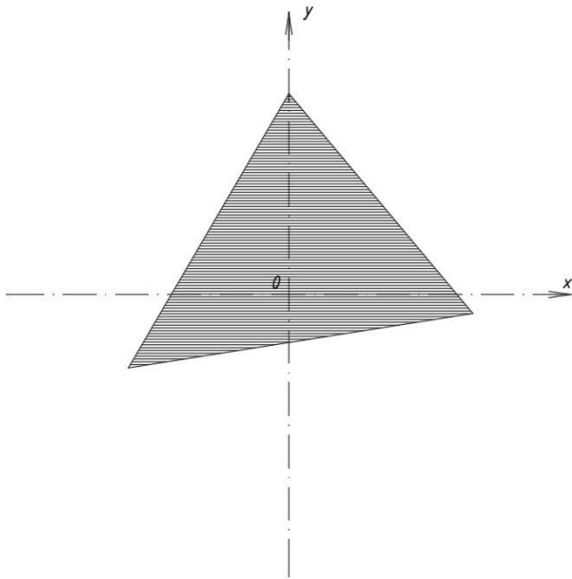


Рис.1. Ортотропная треугольная пластинка  
Fig. 1. Orthotropic triangular plate

Необходимо также отметить, что оси упругой симметрии материала 1 и 2 совпадают с направлениями соответственно осей ОХ и ОУ. Соединение фанерной обшивки с ребрами каркаса панели позволяет считать условия на контуре соответствующими жесткому заземлению. Фанерная пластинка подвергается действию равномерно распределенной нагрузки интенсивностью  $q$ , действующей перпендикулярно плоскости ХОУ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Уравнение изогнутой поверхности пластинки имеет вид [9]:

$$D_1 \frac{d^4 w}{dx^4} + D_2 \frac{d^4 w}{dy^4} + 2(\nu_{yx} D_1 + 2D_k) \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} = q. \quad (1)$$

Здесь жесткости изгиба и кручения для главных направлений упругости записываются так:

$$D_1 = \frac{E_x t^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})}, \quad D_2 = \frac{E_y t^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})},$$

$$D_3 = \nu_{yx} D_1 + 2D_k, \quad D_k = \frac{G_{xy} t^3}{12},$$

где  $E_x$  и  $E_y$  - модули упругости, соответствующие направлениям 1 и 2;

$t$  - толщина пластинки;

$\nu_{xy}, \nu_{yx}$  - коэффициенты Пуассона;

$G_{xy}$  - модуль упругости при сдвиге.

Уравнение (1) можно записать, используя треугольную систему координат. Положение точки на плоскости может быть определено тремя координатами  $\xi, \zeta, \eta$ . Пусть при этом ось  $O\xi$  совмещается с осью  $Ox$ , а каждая из двух других осей  $O\zeta$  и  $O\eta$  составляют с осью  $Ox$  соответственно углы  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 2.).

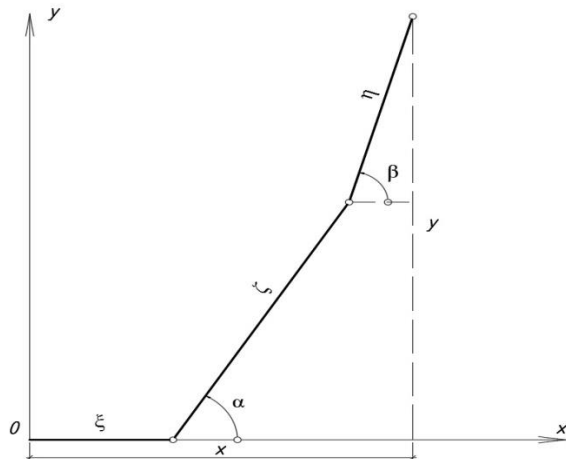


Рис. 2. Треугольная система координат  
Fig. 2. Triangular coordinates system

Уравнения перехода от декартовой к треугольной системе координат имеют вид:

$$x = \xi + \zeta \cos \alpha + \eta \cos \beta,$$

$$y = \zeta \sin \alpha + \eta \sin \beta. \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (1) вместо

$$\frac{d^4 w}{dx^4}, \frac{d^4 w}{dy^4}, \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2}$$

их выражения через производные в треугольной системе координат, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} & D_1 + D_2 ctg^2 \alpha \cdot ctg^2 \beta + 2D_3 ctg \alpha \cdot ctg \beta \frac{d^4 w}{d\xi^4} + \\ & + D_2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \alpha \cdot \sin^2(\beta - \alpha)} \frac{d^4 w}{d\zeta^4} + D_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \beta \cdot \sin^2(\beta - \alpha)} \frac{d^4 w}{d\eta^4} - \\ & - 2(D_2 ctg \alpha \cdot ctg \beta + D_3) \frac{\cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin(\beta - \alpha)} \frac{d^4 w}{d\xi^2 d\zeta^2} + \\ & + 2(D_2 ctg \alpha \cdot ctg \beta + D_3) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cdot \sin(\beta - \alpha)} \frac{d^4 w}{d\xi^2 d\eta^2} - \\ & - 2D_2 \frac{ctg \alpha \cdot ctg \beta}{\sin^2(\beta - \alpha)} \frac{d^4 w}{d\zeta^2 d\eta^2} = q. \end{aligned} \quad (3)$$

Необходимо отметить, что в состав купольных покрытий, конструктивная сеть которых соответствует решеткам икосаэдрального типа, наряду с панелями в форме косоугольных треугольников входят панели с равновеликими сторонами. Этот частный случай панелей в форме равностороннего треугольника важен в практических приложениях для расчета элементов многогранных куполов. В этом случае обшивки

панелей выполняются в виде равносторонней треугольной пластинки, для которой  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 120^\circ$ , и уравнение (3) в этом случае переписывается так:

$$\frac{1}{4}(9D_1 + D_2 - 6D_3)\frac{d^4w}{d\xi^4} + D_2\left(\frac{d^4w}{d\xi^2 d\eta^2} + 2\frac{d^4w}{d\xi^2 d\eta^2} + \frac{d^4w}{d\eta^4}\right) - (D_2 - 3D_3)\left(\frac{d^4w}{d\xi^2 d\zeta^2} + \frac{d^4w}{d\xi^2 d\eta^2}\right) = \frac{9}{4}q. \quad (4)$$

В соответствии с приведенной на рис. 3 нумерацией узлов введем для производных по новым переменным  $\xi, \zeta, \eta$  их центральные конечные разности.

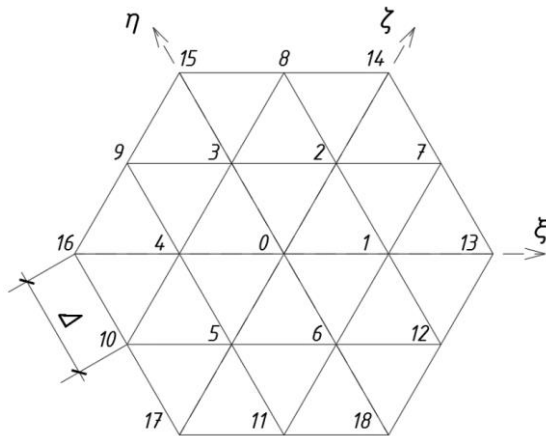


Рис. 3. Схема нумерации узлов  
Fig. 3. Nodenumberscheme

Обозначив  $D_2/D_1 = d_{21}$ ,  $D_3/D_1 = d_{31}$ , основное уравнение задачи запишем в таком виде:

$$6(9 + 9d_{21} + 10d_{31})w_0 - 4(9 - 5d_{21} + 6d_{31})(w_1 + w_4) - 4(7d_{21} + 3d_{31})(w_2 + w_3 + w_5 + w_6) + 8d_{21}(w_8 + w_{11}) - 4(d_{21} - 3d_{31})(w_7 + w_9 + w_{10} + w_{12}) + (9 + d_{21} - 6d_{31})(w_{13} + w_{16}) + 4d_{21}(w_{14} + w_{15} + w_{17} + w_{18}) = \frac{9qa^4}{D_1}. \quad (5)$$

Используя значения упругих характеристик семислойной клееной березовой фанеры марки ФСФ [10]  $E_x=9000$  МПа,  $E_y=6000$  МПа,  $G_{xy}=750$  МПа,  $\nu_{xy}=0,085$ ,  $\nu_{yx}=0,065$  при  $t=8$  мм,  $a=1400$  мм находим:  $D_1=386,1$  Нм,  $D_2=257,4$  Нм,  $D_3=89,1$  Нм,  $D_k=32,0$  Нм,  $d_{21}=0,67$ ,  $d_{31}=0,23$ .

Тогда основное уравнение задачи об изгибе ортотропной пластинки в форме равностороннего треугольника получает вид:

$$103,84w_0 - 28,205(w_1 + w_4) - 21,436(w_2 + w_3 + w_5 + w_6) + 5,333(w_8 + w_{11}) + 0,102(w_7 + w_9 + w_{10} + w_{12}) + 8,282(w_{13} + w_{16}) + 2,667(w_{14} + w_{15} + w_{17} + w_{18}) = \frac{9qa^4}{D_1}. \quad (6)$$

Нанесем на пластинку треугольную сетку, разделяющую ее на 144 треугольных ячейки таким образом, что  $\Delta = a/12$  (рис. 4).

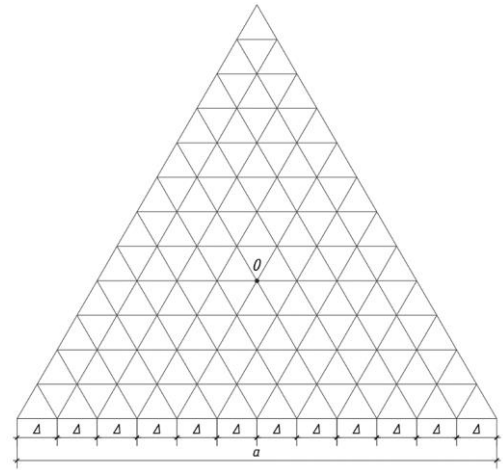


Рис. 4. Схема треугольной сетки пластинки  
Fig. 4. Scheme of a triangular mesh plate

Здесь  $a$ -длина стороны пластинки. Применяя уравнение (6) последовательно ко всем внутренним точкам пластинки и принимая во внимание условие жесткого защемления ее на контуре, получаем систему линейных уравнений, решение которой для центра пластинки дает

$$w_0 = 0,000314 \frac{qa^4}{D_1}. \quad (7)$$

## ВЫВОДЫ

Для сравнения в нижеследующей таблице приведены полученные различными авторами значения числового коэффициента в формуле для определения величины упругого прогиба центральной точки ортотропной пластинки в форме равностороннего треугольника, жестко защемленной по контуру.

Таблица 1.  
Table 1.

	С.Г. Лехницкий [11]	А.А. Журавлев [6]	МКР
$\frac{w_0 D_1}{qa^4}$	0,000234	0,000242	0,000314

Сравнение приведенных значений позволяет сделать вывод о том, что выбранное число делений пластинки уже дает в рассматриваемом случае достаточную для практического применения точность. В целях достижения более точного результата при выполнении расчета по МКР необходимо покрывать пластинку более густой сеткой, имеющей большее число треугольных ячеек. При этом следует соблюдать требование расположения центрального узла сетки на поверхности пластинки, совпадающего с ее центром. Такая сеть может быть получена в результате деления пластинки на 324 треугольных ячейки, при этом  $\Delta = a/18$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлические конструкции. Справочник проектировщика/Под редакцией Н.П. Мельникова-М.: Стройиздат, 1980. - 776с.
2. Мельников Н.П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития-М.: Стройиздат, 1983. - 543с.
3. Журавлев А.А. Купольные покрытия из дерева и пластмасс. Спецкурс. -Ростов-на-Дону: Рост. инж. строит. ин-т, 1983. - 102с.
4. Журавлев А.А., Муро Г.Э., Кимсуор Лонг, Журавлев Ан.А. Стержневые конструкции многогранных куполов. – Ростов-на-Дону: РИЦ РГСУ, 2007. - 318с.
5. Makowski Z.S. Analysis, design and construction of braced domes. – London a.o.: Granada, 1984. - 701p., ill.
6. Журавлев А.А. Прочность и устойчивость пологих многогранных куполов из дерева и пластмасс. Дис. докт. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1987. – 335с.
7. Скуратов С.В. Теоретические основы расчета и проектирования деревянных конструкций непологих многогранных куполов. Дис. канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1990. – 168с.
8. Евтушенко А.И., Самсонова А.Н., Скуратов С.В. Формообразование конструктивных сетей многогранных непологих куполов. Инженерный вестник Дона. Т.44, №1(44), 2017. – с.115.
9. Кисилев В.А. Расчет пластин. – М.: Стройиздат, 1973. - 151с.
10. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М.:

Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2017. – 102с.

11. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1957. – 463с.

## REFERENCES

1. Metal constructions. Designer's Handbook / Under the editorship of N.P. Melnikova-M.: Stroyizdat, 1980. - 776p.
2. Melnikov N.P. Metallic structures: The current state-of-the-art and development prospects-M.: Stroyizdat, 1983. – 543p.
3. Zhuravlev A.A. Dome coverings of wood and plastics. Special course. -Rostov-on-Don: Growth. Ing. builds Inst., 1983. – 102p.
4. Zhuravlev A.A., Muro G.E., Kimsuor Long, Zhuravlev An.A. Rod constructions of multifaceted domes. - Rostov-on-Don: RIC RSCU, 2007. – 318p.
5. Makowski Z.S. Analysis, design and construction of braced domes. – London a.o.: Granada, 1984. - 701p., ill.
6. Zhuravlev A.A. Durability and stability of shallow polyhedral domes made of wood and plastics. Dis. Dr. tech. sciences. - Rostov-on-Don, 1987. – 335p.
7. Skuratov S.V. Theoretical bases of calculation and design of wooden structures of nepolyh many-sided domes. Dis. Cand. tech. sciences. - Rostov-on-Don, 1990. – 168p.
8. Evtushenko A.I., Samsonov A.N., Skuratov S.V. The formation of constructive networks of multifaceted nepolyh domes. Engineering herald Don. T.44, №1 (44), 2017. - p.115.
9. Kiselev V.A. Plate calculation. - М. : Stroyizdat, 1973. – 151p.
10. SP 64.13330.2017. Wooden structures. Updated version of SNiP II-25-80. - М. : Ministry of Construction and Municipal Economy, 2017. – 102p.
11. Lekhnitsky S.G. Anisotropic plates. - М. : State. publishing house of technical and theoretical literature, 1957. - 463p.

## CALCULATION OF THE TRIANGULAR COVERS OF MULTIPLE RETAINED DOMES

Skuratov S.V, Skidan A.A, Kevorkov A.E.

**Summary:** Spatial lattice structures that form a mesh system on the surface are considered. Spherical single-mesh coatings are in the form of ribbed, ribbed-annular and mesh domes. Domes are designed on the basis of triangular mesh grids. Constructive materials are wood and materials based on it. The experience of modern construction of spatial coatings in the form of mesh domes is being studied. The construction of spatial point lattices of the icosahedral type in the form of 80, 320, and 1280 facets is given. The sizes of rods and triangles that make up the spherical surface of the dome are determined. The construction of a triangular panel of a multi-faceted net dome with a covering in the form of an orthotropic plywood plate is considered. The differential equation of the curved surface of the plate is used to determine its deflections. The dependences of the transition from the Cartesian to the triangular coordinate system are used. A special case of sheathing of glue plywood panel in the form of an equilateral triangular plate is considered. The case of covering from birch construction plywood is investigated, the values of the elastic characteristics of plywood with increased moisture resistance are given. The basic equation of the problem of bending an orthotropic plate in the shape of an equilateral triangle using the finite difference method is written. A diagram of a triangular mesh applied to the plate which dividing the plate into 144 triangular cells is being displayed. The system of equations for interior points was obtained under the condition of its pinching on the contour. The solution of the system of equations is implemented by the expression for the deflection of the central point of an orthotropic plate in the form of an equilateral triangle, rigidly clamped along the contour obtained in the works of other authors. Comparison of the result obtained with known solutions. It is concluded that the plate surface is sufficiently to divide into 144 triangular cells. It is proposed to use a grid divided into 324 cells to achieve a more accurate result.

**Key words:** Dome, plywood, trim, orthotropic, mesh, finite difference method.

## ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛИДЫ ДЮПЕНА НА ПРИМЕРЕ КУЛАЧКОВОГО ЗАЖИМА

Латышев С. С., Тищенко И. В., Дронова А. В.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,  
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,  
lat.sergej@gmail.com, ira\_koroleva@inbox.ru, 46, dav0212@yandex.ru

**Аннотация.** Циклида Дюпена принадлежит к каналовым поверхностям. Известно, что циклиды Дюпена – единственные поверхности, у которых фокальные поверхности, т.е. поверхности, состоящие из множеств точек центров кривизн, вырождены в кривые второго порядка. Два множества дают две софокусные коники. Именно поэтому любое исследование циклид Дюпена имеет большой интерес – как научный, так и прикладной. В работах, посвященных циклиде Дюпена, глубоко изучаются свойства и вопрос применения этой поверхности в разных отраслях. На основе свойств циклид разработаны различные изобретения, касающиеся приборов для вычерчивания и имеющие возможность применяться в разных геометрических построениях с применением компьютерных технологий. В настоящей работе изучается вопрос применения компьютерных технологий для моделирования поверхности циклиды Дюпена на примере использования этой поверхности в отрасли машиностроения в качестве кулачкового зажима. Основопологающим для построения поверхности циклиды является выбор способа ее задания, варианты которых рассмотрены в работе – от традиционного способа при помощи трех заданных сфер до кривых второго порядка. При этом, если тремя сферами можно задать четыре циклиды, а при задании циклиды посредством кривой второго порядка (коникой) и сферой их число уменьшается до двух, то при задании с помощью коники и одной из двух осей циклиды получим единственную циклиду Дюпена. Возможность и степень погрешности построения циклиды Дюпена с применением программ компьютерного моделирования представлены на примере применения программы SolidEDGE. Работа в достаточной мере иллюстрирована.

**Предмет исследования:** предметом исследования является поверхность циклиды Дюпена. Исследуется компьютерное моделирование этой сложной геометрической поверхности в графической программе, учитывая достоинства и ограничения возможностей компьютерной графики, на примере канавки кулачкового механизма.

**Материалы и методы:** применяется графическая программа для компьютерного проектирования, SolidEDGE.

**Результаты:** сравнительный анализ полученных данных построений выявил закономерность, заключающуюся в том, что относительная погрешность размеров сечений уменьшается с ростом числа сечений, задаваемых при построении поверхности.

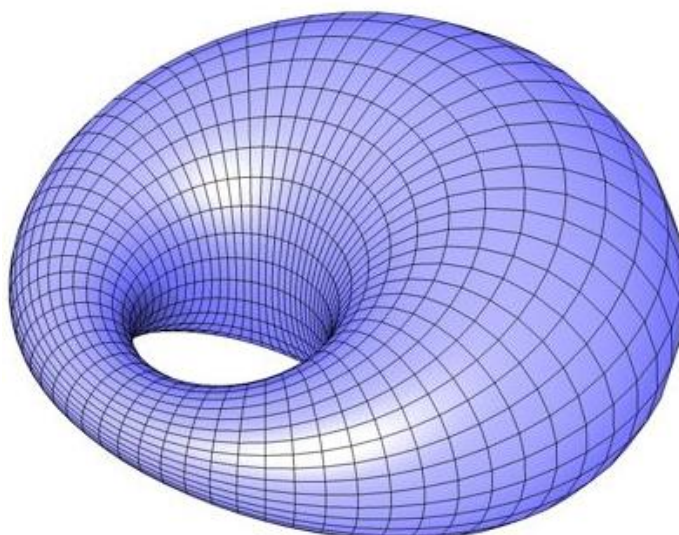
**Выводы:** предмет исследования (циклида Дюпена) выигрышно сочетает в себе возможность показа на его примере механизма геометрического моделирования, возможность компьютерной реализации и практическую ценность полученных результатов при компьютерном моделировании узлов и механизмов, в которых задействована циклида Дюпена.

**Ключевые слова:** циклида Дюпена; конструирование поверхности; кривые второго порядка; компьютерная графика

## ВВЕДЕНИЕ

Циклида Дюпена является интересной для изучения поверхностью [26]. Любое исследование циклид Дюпена имеет большой интерес – научный [2; 5; 9; 12-15] и прикладной [1; 11; 16; 17; 19; 20]. Она принадлежит к каналовым поверхностям [3-6; 9; 10]. Каналовая поверхность образуется непрерывным каркасом замкнутых плоских сечений, определенным образом ориентированных в пространстве. Площади этих сечений монотонно изменяются в процессе их перемещения по направляющей или могут быть постоянными [8]. В

общем случае на каждой поверхности существует два взаимно ортогональных семейства линий кривизны – линий на поверхности, которые в каждой своей точке имеют касательными одно из главных направлений. Исключением являются поверхности сферы и плоскости, на которых все линии являются линиями кривизны [24]. Циклида Дюпена является двухканальной поверхностью – поверхностью, на которой оба семейства линий кривизны являются семействами окружностей. Частным случаем циклиды Дюпена являются тор, цилиндрическая и коническая поверхности вращения [8].



**Рис. 1.** Циклида Дюпена  
**Fig. 1.** DupinCyclide

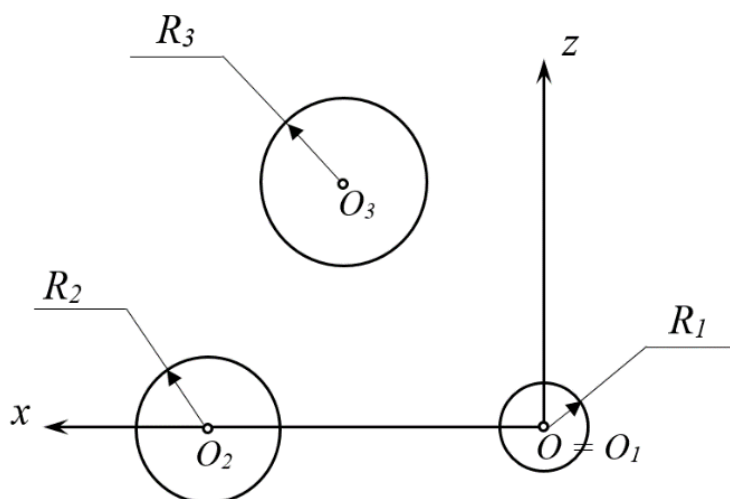
### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

При рассмотрении циклиды Дюпена как каналовой поверхности, понятен характер образования этой поверхности. Из общего центра (полюса) проводятся плоскости, вращающиеся вокруг оси, проходящей через полюс. В каждой плоскости проводится образующая окружность. Положение центра и радиус образующей окружности должны определяться так, чтобы эти окружности являлись линиями кривизны получаемой поверхности [8]. Известно, что циклиды Дюпена – единственные поверхности, у

которых фокальные поверхности, т. е. поверхности, состоящие из множества точек центров кривизн, вырождены в кривые второго порядка: эллипс, гипербола, парабола. [18].

В зависимости от способа задания циклиды Дюпена можно получить различное количество ее возможных форм, от единственно возможной до нескольких. В результате исследования в работе [21] получены следующие способы задания циклид Дюпена.

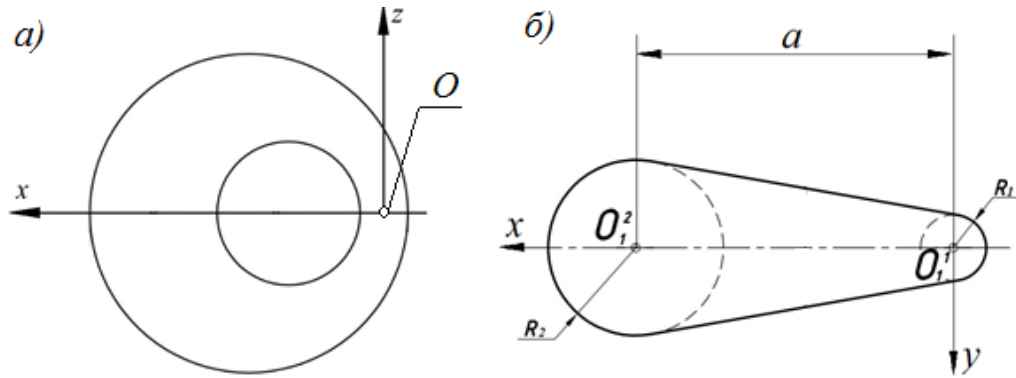
1. Задание тремя сферами. В результате получим четыре циклиды Дюпена (рис. 2).



**Рис. 2.** Задание тремя сферами  
**Fig. 2.** Representation by threespheres

2. Задание циклиды Дюпена ее очерками: на плоскости проекций, параллельные плоскостями симметрии циклид (на плоскость симметрии  $xOz$

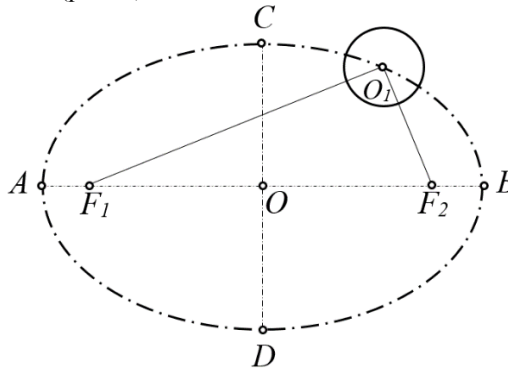
или на плоскость симметрии  $xOy$ ). Получаем единственную циклиду Дюпена (рис. 3).



**Рис. 3.** Задание циклиды Дюпена очерками:  
 $a$  – на плоскость симметрии  $xOz$ ;  $b$  – на плоскость симметрии  $xOy$ .

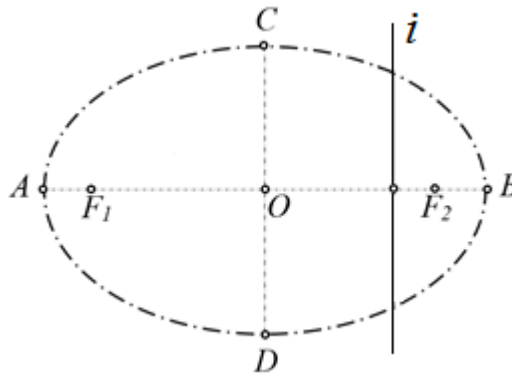
**Fig. 3.** Dupin Cyclide representation by outlines:  
 $a$  – to plane of symmetry  $xOz$ ;  $b$  – to plane of symmetry  $xOy$ .

3. Задание коникой (эллипс, гипербола или парабола) и сферой, центр которой принадлежит этой конике. Получаем 2 циклиды Дюпена (рис. 4).



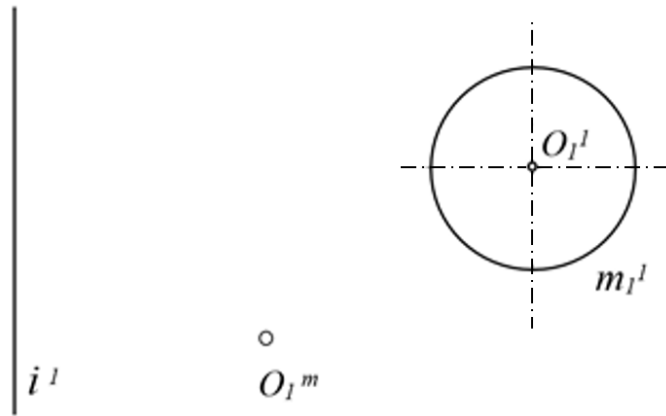
**Рис. 4.** Задание коникой и сферой.  
**Fig. 4.** Representation by cone and sphere

4. Задание циклиды коникой и одной из осей циклиды. Получаем единственную циклиду Дюпена (рис. 5).



**Рис. 5.** Задание циклиды коникой и одной из осей циклиды  $-i$   
**Fig. 5.** Representation by cone and one of the axes of the cyclide  $-i$

5. Задание циклиды одной из осей, одним из очерков и центром касательной к циклиде сферы. Получаем единственную циклиду Дюпена.

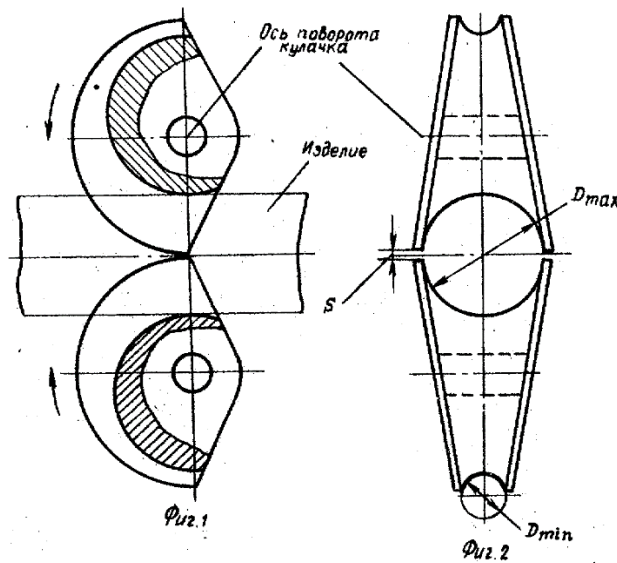


**Рис. 6.** Задание циклиды одной из осей, одним из очерков и центром сферы  
**Fig. 6.** Representation by one of Cycloide axis, one of one of Cycloide outlines and sphere center

Все приведенные способы построения подходят для компьютерного моделирования.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности поверхности циклиды Дюпена применяют в области машиностроения. Рассмотрим их на примере кулачкового зажима. Это изделие может применяться для зажима прутковых и трубчатых деталей [23].



**Рис. 7.** Кулачковый зажим.  
**Fig. 7.** The cam lock.

Основными элементами зажима являются два кулачка, на поверхности которых выполнена проточка в виде поверхности, представляющей собой часть циклиды Дюпена. В каждом из радиальных сечений данных кулачков линия рабочей поверхности образует половину окружности, являющейся образующей циклиды Дюпена. При такой конфигурации рабочей поверхности кулачка осуществляется контакт с заготовкой по всему периметру профиля. При этом

зев, образованный двумя кулачками, может меняться в пределах от максимального до минимального диаметра, чем обеспечивается зажим заготовок, различающихся по сортаменту. В результате повышаются технологические возможности за счет осуществления контакта по всему периметру профиля заготовок, в отличие от других зажимов, у которых площадь контакта уменьшается при увеличении диаметра заготовок.

Рассмотрим компьютерное моделирование поверхности циклиды Дюпена на примере кулачкового зажима с помощью программы SolidEDGE[14, 15].

Исходные данные для построения циклиды Дюпена приведены на рис. 8. В качестве исходных сечений заданы окружности радиусом  $R_1$  и  $R_2$ , диаметр экватора поверхности  $D$ . Положение оси  $j$  было определено согласно [22].

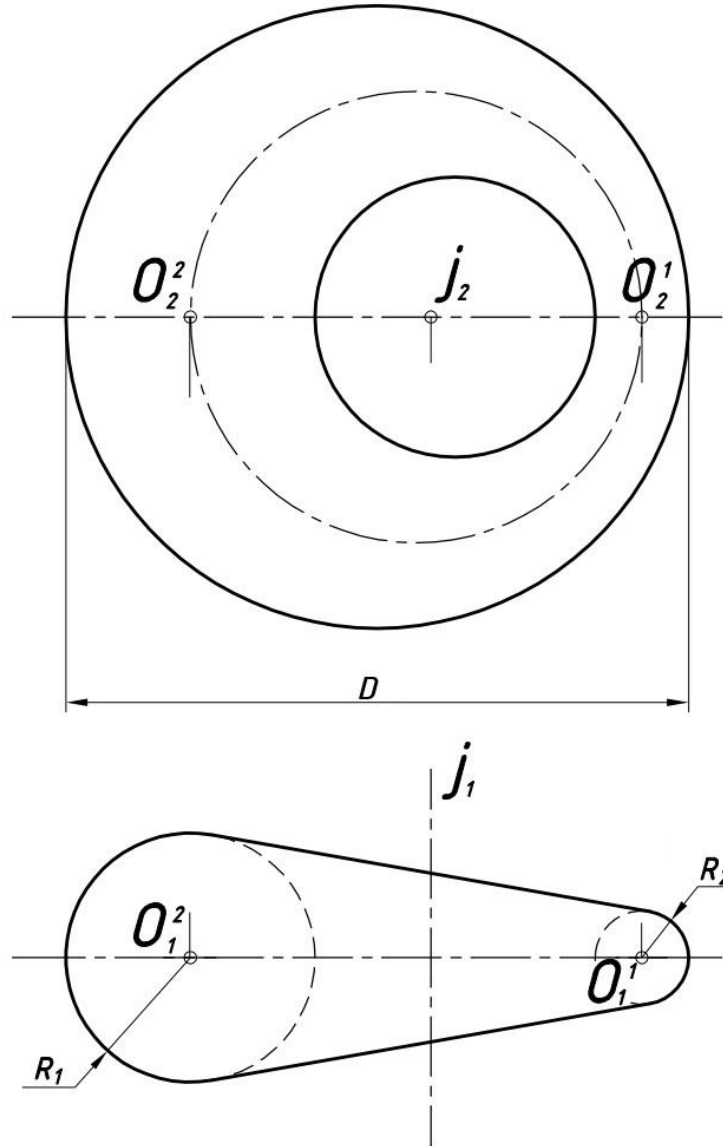
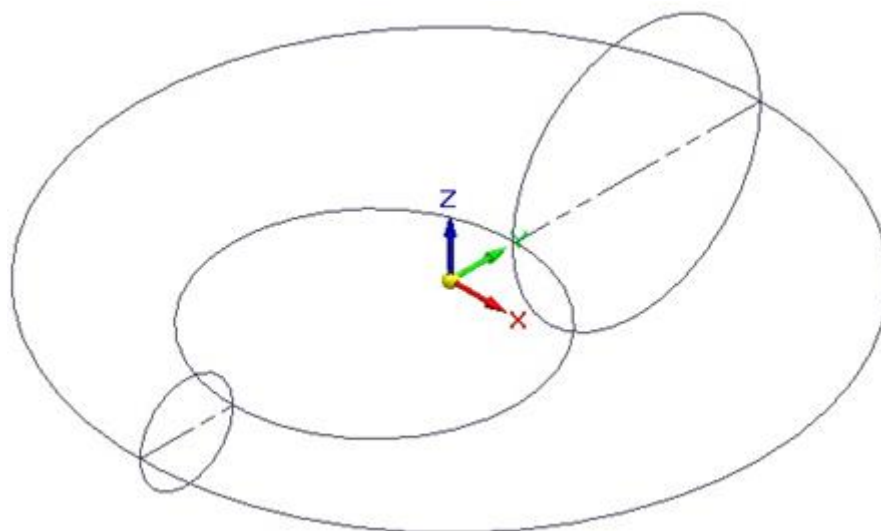


Рис. 8. Параметры циклиды Дюпена.  
Fig. 8. DupinCyclidefeatures.

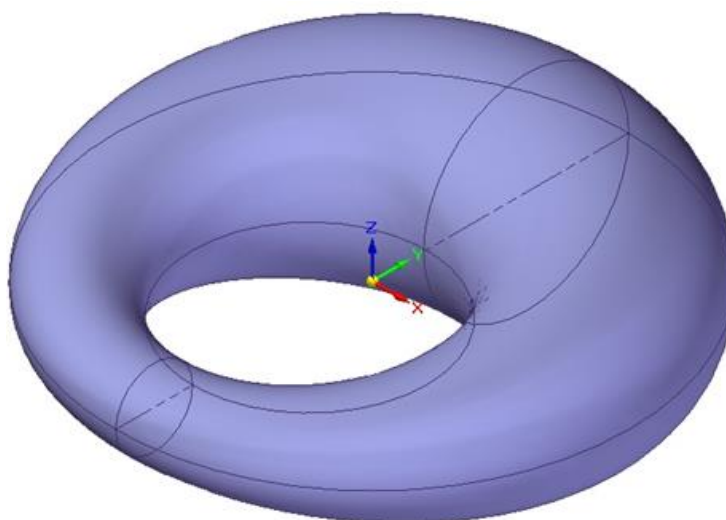
Для построения циклиды Дюпена в SolidEDGE использовалась функция «Выступ по направляющим» (рис. 9). Поверхность циклиды была построена по двум сечениям и двум направляющим, для чего были заданы поперечные

сечения поверхности в плоскости YZ исходных диаметров, а в качестве направляющих – две окружности плоскости XY, являющиеся очерками циклиды.



**Рис. 9.** Построение циклиды Дюпена по двум направляющим и двум сечениям  
**Fig. 3.** DupinCyclide modelling by two outlines and two sections.

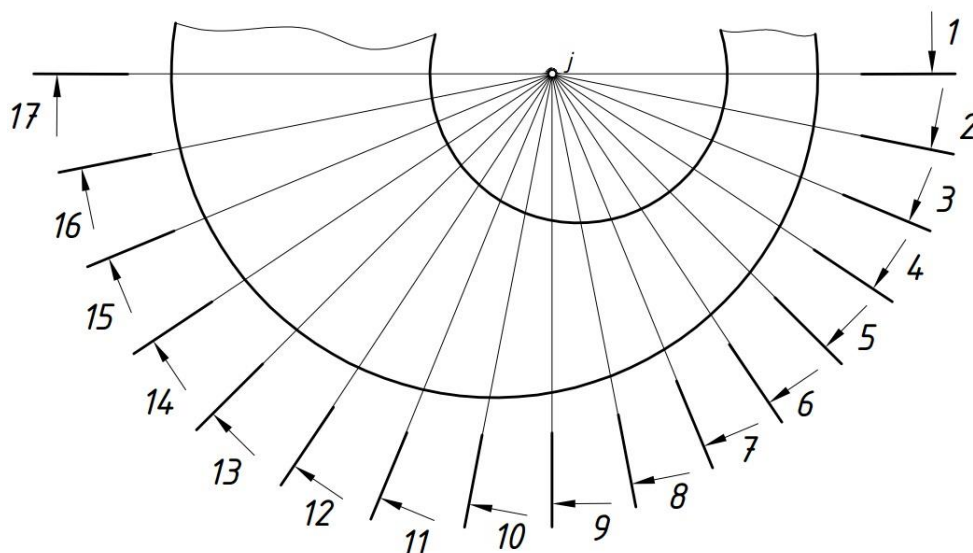
В результате получаем поверхность циклиды Дюпена (рис. 10).



**Рис. 10.** Поверхность циклиды Дюпена в программе SolidEDGE.  
**Fig. 10.** DupinCyclide surface in program Solid EDGE.

С целью определения точности построения поверхности циклиды в SolidEDGE по исходным данным (рис. 8) были построены поверхности по 4, 8, 16 и 32 сечениям.

Ввиду того, что диаметр сечения циклиды плоскостью, проходящей через ось  $j$ , изменяется по нелинейному закону, для каждого сечения его размеры были определены графически (рис. 11) и занесены в табл. 1.



**Рис. 11.** Изменение диаметров сечения циклиды.  
**Fig. 11.** Change of Cyclide section diameters.

**Таблица 1.** Размеры диаметров сечения циклиды.  
**Table 1.** Sizes of Cyclide section diameters.

Сечение	Диаметр, мм	Сечение	Диаметр, мм
1-1	14,00	10-10	29,12
2-2	14,23	11-11	31,61
3-3	14,93	12-12	33,92
4-4	16,06	13-13	35,98
5-5	17,59	14-14	37,68
6-6	19,48	15-15	38,95
7-7	21,66	16-16	39,73
8-8	24,05	17-17	40,00
9-9	26,57		

По результатам построения в SolidEDGE были получены чертежи каждой модели, а также построены сечения циклиды плоскостями А-А и Б-Б (рис. 12), размеры которых указаны в табл. 2. Ввиду того, что программа закладывает в полученный результат (чертеж) некую погрешность, ее значение было зафиксировано

выполнением дополнительных построений. Так, на полученное сечение командой «Чертеж на виде» была наложена окружность, диаметр которой был определен графически аналогично сечениям из табл. 1, а видимая разница между контурами сечений образмерена (рис. 13).

**Таблица 2.** Размеры сечений А-А и Б-Б.  
**Table 2.** Sizes of section А-А and Б-Б.

Сечение	Диаметр, мм	Сечение	Диаметр, мм
А-А (меньшее)	20,18	Б-Б (меньшее)	15,63
А-А (большее)	33,18	Б-Б (большее)	38,15

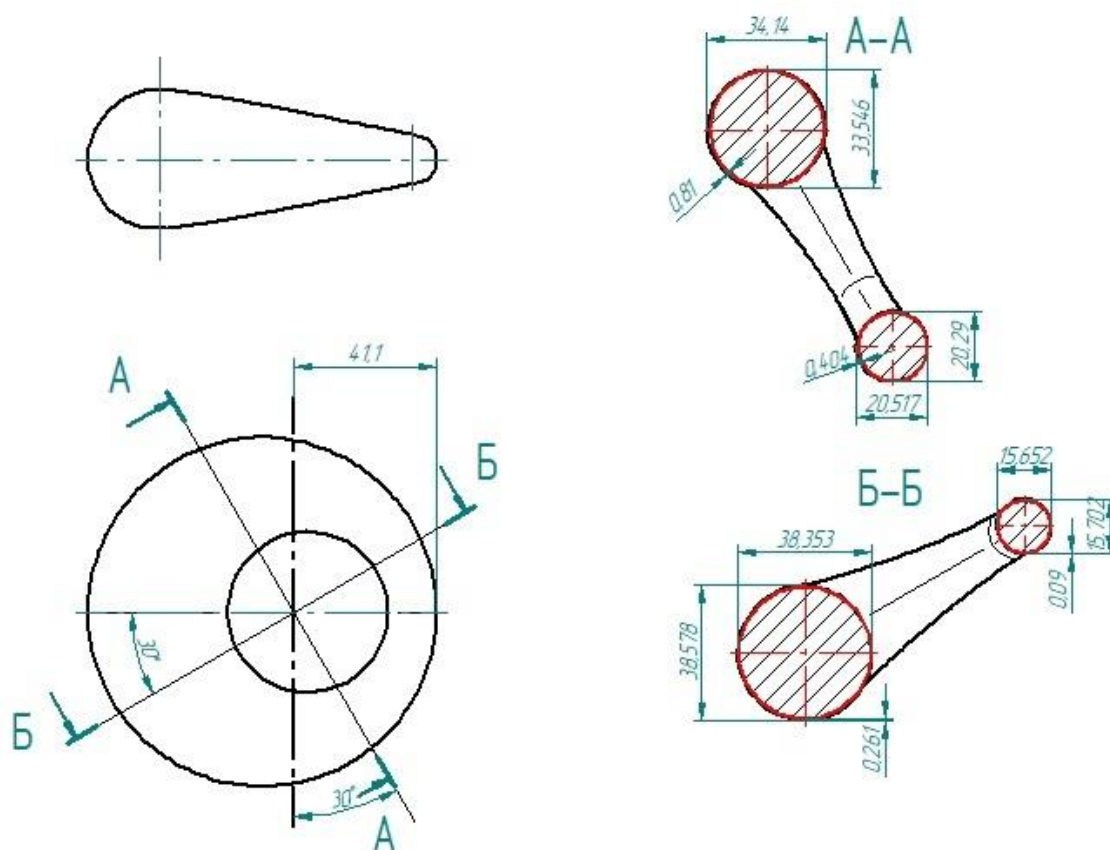


Рис. 12. Чертеж циклиды Дюпена.

Fig. 12. DupinCyclide drawing.

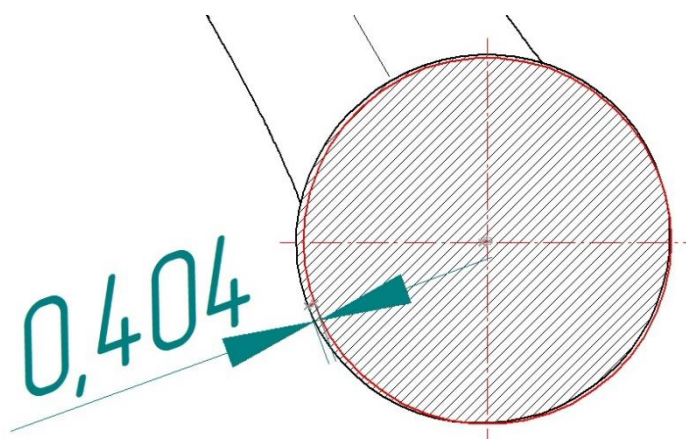


Рис. 13. Погрешность построения сечения циклиды

Fig. 13. Construction error of Cyclide section

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Сравнительный анализ полученных данных выявил следующую закономерность (рис. 14). Относительная погрешность размеров сечений уменьшается с ростом числа сечений, задаваемых при построении модели, однако значительного

изменения величины погрешности при увеличении числа сечений с 8 до 32 не происходит, что делает эту процедуру нецелесообразной ввиду высокой трудоемкости построений.

Зависимость максимальной абсолютной погрешности построений от количества сечений приведены на рис. 15.

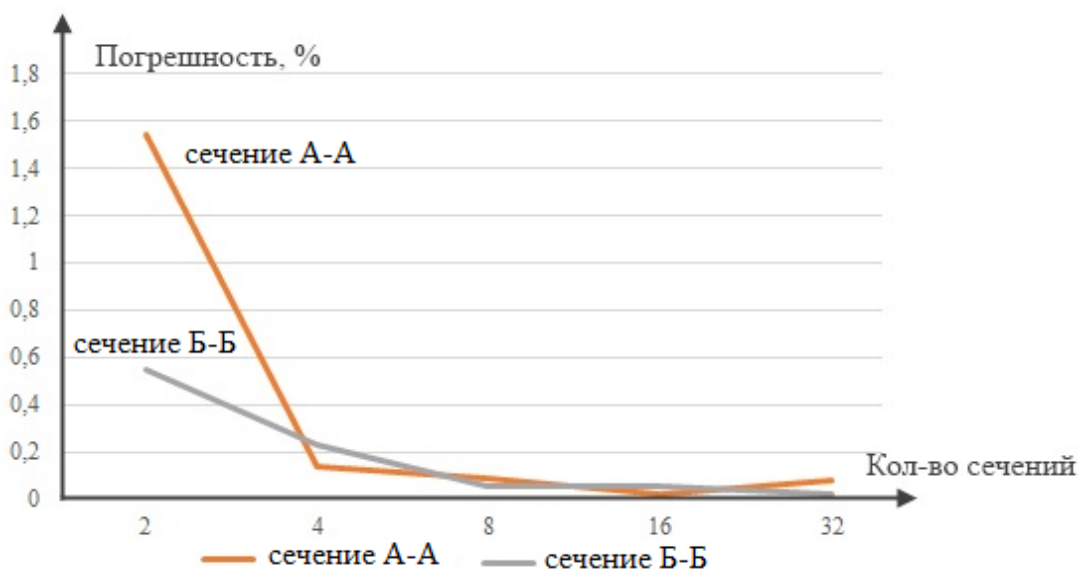


Рис. 14. Относительная погрешность размеров сечений  
Fig. 14. Relative error of section sizes

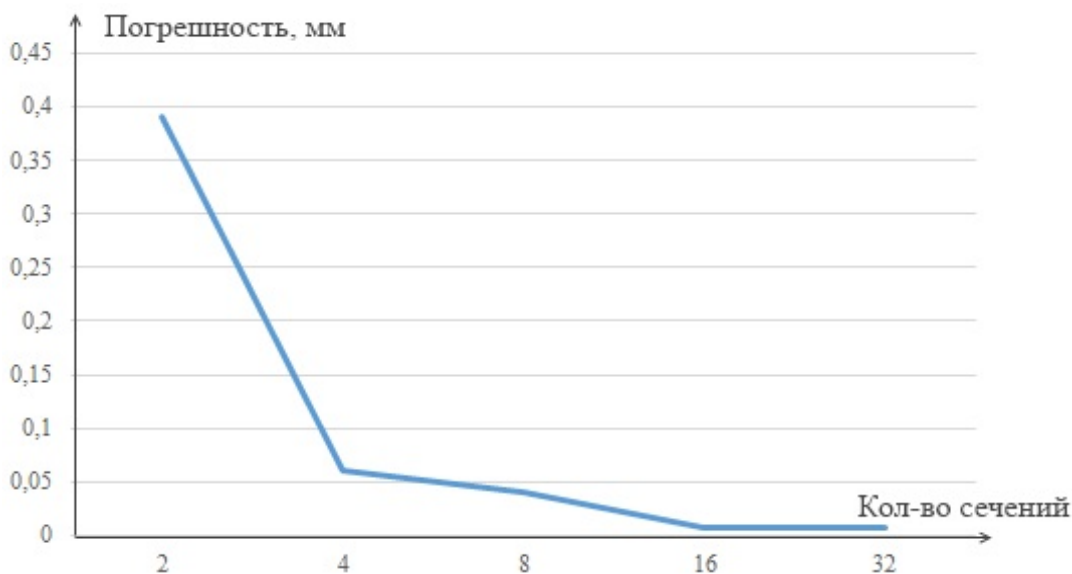


Рис. 15. Абсолютная погрешность размеров сечений, мм  
Fig. 15. Absolute error of section sizes, mm

## ВЫВОДЫ

Данные значения могут быть приняты инженерами в качестве ориентира для задания допусков при компьютерном моделировании узлов и механизмов, в которых задействована циклида Дюпена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргунов Б.И. Геометрические построения на плоскости / Б.И. Аргунов, М.Б. Балк. – М.: Учпедгиз, 1957. – 267 с.
2. Аргунов Б.И. Элементарная геометрия / Б.И. Аргунов, М.Б. Балк. – М.: Просвещение, 1996. – 240 с.
3. Берже М. Геометрия. Т. 1 / М. Берже. – М.: Мир, 1984. – 500 с.
4. Берже М. Геометрия. Т. 2 / М. Берже. – М.: Мир, 1984. – 368 с.
5. Гильберт Д. Наглядная геометрия / Гильберт Д., С. Кон-Фоссен. – М.-Л.: Объединенное научно-

техническое издательство НКТП СССР, Главная редакция общетехнической литературы и номаграфии, 1936. – 302 с.

6. *Грязнов Я.А.* Отсек канальной поверхности как образ цилиндра в расслояемом образовании // *Грязнов Я.А. Геометрия и графика.* – 2012. – Т. 1. – №1. – С. 17-19. – DOI: 10.12737/2077.

7. *Диденко Д.В.* Учимся работать в SolidEDGE / Д.В. Диденко. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 250 с.

8. *Иванов В.Н.* Некоторые аспекты геометрии циклида Дюпена. Вестник Российского университета дружбы народов №1. Серия: Инженерные исследования. Издательство: Российский университет дружбы народов, Москва, 2002. с. 12 – 21.

9. *Клейн Ф.* Высшая геометрия / Ф. Клейн. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939.

10. *Куприков М.Ю.* Инженерная графика / М.Ю. Куприков, Л.В. Маркин. – М.: Дрова, 2010. – 496 с.

11. *Левитский В.С.* О теме «Сопряжения» в курсе «Инженерная графика» / В.С. Левитский // Сборник научно-методических статей по начертательной геометрии и инженерной графике. – М.: Высшая школа, 1980. – С. 44-51.

12. *Надолинный В.А.* Аналитические методы в конструировании поверхностей / В.А. Надолинный. – Киев: КПИ, 1981.

13. *Сальков Н.А.* Об особенностях оси торовой поверхности переменного радиуса / Н.А. Сальков // *Прикладная геометрия и инж. графика.* – Вып. 33. – Киев: Будівельник, 1982. С. 79-80.

14. *Сальков Н.А.* О некоторых закономерностях, имеющих место при касании сфер / Н.А. Сальков // *Прикладная геометрия и инж. графика.* – Киев: Будівельник, 1981. – №32. С. 113–115.

15. *Сальков Н.А.* Свойства циклида Дюпена и их применение. Ч.1 / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2015. – Т. 3. – №1. – С. 16-25. – DOI: 10.12737/10454.

16. *Сальков Н.А.* Свойства циклида Дюпена и их применение. Ч. 3: сопряжения / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2015. – Т.3. – №4. – С. 3-14. – DOI: 10.12737/17345.

17. *Сальков Н.А.* Свойства циклида Дюпена и их применение. Ч. 4: приложения / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2016. – Т. 4. – №1. – С. 21-32. – DOI: 10.12737/17345.

18. *Сальков Н.А.* Способы задания циклиды Дюпена / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2017. – №3. – с. 11 - 20.

19. *Сальков Н.А.* Циклида Дюпена и кривые второго порядка. Ч. 1. / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2016. – Т. 4. – №2. – С. 19-28. – DOI: 10.12737/19829.

20. *Сальков Н.А.* Циклида Дюпена и кривые второго порядка. Ч. 2. / Н.А. Сальков // *Геометрия и графика.* – 2016. – Т. 4. – №3. – С. 17-28. – DOI: 10.12737/21530.

21. *Сальков Н.А.* Циклида Дюпена и ее приложение / Н. А. Сальков. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 142 с.

22. *Сальков Н.А.* Циклида Дюпена и ее приложение: монография / Н.А. Сальков. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 141 с. – (Научная мысль). – [www.dx.doi.org/10.12737/18824](http://www.dx.doi.org/10.12737/18824).

23. *Ткачук П.Д.* Патент СССР от 15.05.1979 г. №662275. Экцентриковый зажим. / П.Д. Ткачук, С.В. Величкович. Ивано-Франковский институт нефти и газа. – 1979.

24. *Фавар Ж.* Курс локальной дифференциальной геометрии / Пер. с франц. Ю.А. Рожанской и С.П. Финикова. Изд-во Иностранной литературы, М. 1960 г. – 322 с.

25. *Шахнов В.А.* Основы конструирования в SolidEDGE. Пособие по проектированию изделий в приборостроении / В.А. Шахнов, Л.А. Зинченко, В.А. Соловьев, А.Е. Курносенко. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 272 с.

26. *Dupin Ch.* Developpements de geometrie, P., 1813.

## REFERENCES

1. Argunov B.I. Geometric heskiepostroeniya na ploskosti. M.: Uchpedgiz, 1957. p. 267.

2. Argunov B.I. Elementarnayageometriya. M.: Prosveschenie, 1996. p.240.

3. Berzhe M. Geometriya. V. 1. M.: Mir, 1984. p. 500.

4. Berzhe M. Geometriya. V. 2. M.: Mir, 1984. p. 368.

5. Gilbert D. Naglyadnayageometriya/ M.: Ob'edinennaenauchno-tehnicheskoeizdatelstvo NKTP SSSR, Glavnaya redaktsiya obschetechnicheskoy literaturyiino mografii, 1936. P. 302.

6. Gрязнов Я.А. Otsekkanalovoy poverhnosti kak obraz tsilindra v rassloyaemomobrazovanii. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2012. -V. 1, No. 1, P. 17-19.

7. Didenko D.V. Uchimsyarabotat v Solid EDGE. – М.: ДМК Пресс, 2009. p. 250.

8. Ivanov V.N. Nekotoryie aspekty geometrii tsiklid Dyupena. *Vestnik Rossiyskogo universitadruzhbyinarodov.* 2002.No. 1. p. 12 – 21.

9. Kleyn F. Vysshayageometriya. M.: GONTI, 1939.

10. KuprikovM.Yu. Inzhenernayagrafika. M.: Drova, 2010. p. 496

11. Levitskiy V.S. O teme «Sopryazheniya» v kurse «Inzhenernayagrafika» *Sborniknauchno-metodic heskihstateyponachertatelnoygeometriiinzhenernoygrafike.* M.: Vysshayashkola, 1980. p. 44-51.

12. Nadolnnyiy V.A Analiticheskietodiyi v konstruirovaniipoverhnostey. Kiev: KPI, 1981.

13. Salkov N.A. Ob osobennosty ahositorovoy poverhnosti peremennogo radiusa *Prikladnaya geometriyaiinzh. grafika.* No. 33. Kiev: Budivelnik, 1982. P. 79-80.

14. Salkov N.A. O nekotoryihzakonomernostyah, imeyushihmestoprikasaniisfer*Prikladnayageometriyaiinzh. grafika.* Kiev: Budivelnik, 1981. No. 2. P. 113–115.

15. Salkov N.A. Svoystvatsiklid Dyupenaiihprimenenie. Ch.1. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2015, V. 3, No.1. – P. 16-25.
16. Salkov N.A. Svoystvatsiklid Dyupenaiihprimenenie. Ch. 3. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2015, V.3, No.4. P. 3-14.
17. Salkov N.A. Svoystvatsiklid Dyupenaiihprimenenie. Ch. 4. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, No.1. P. 21-32.
18. Salkov N.A. Sposoby izadaniyatsiklidy Dyupena. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2017. p. 11 - 20.
19. Salkov N.A. Tsiklida Dyupenaikrivyievtorogo poryadka. Ch. 1. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, No. 2, p. 19-28.
20. Salkov N.A. Tsiklida Dyupenaikrivyievtorogo poryadka. Ch. 2. *Geometriyaigrafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, No. 3, p. 17-28.
21. Salkov N.A. TsiklidaDyupenaieeprilozhenie. M.: INFRA-M, 2016. p. 142.
22. Salkov N.A. TsiklidaDyupenaieeprilozhenie: monografiya M.: INFRA-M, 2018. – 141 p. [www.dx.doi.org/10.12737/18824](http://www.dx.doi.org/10.12737/18824).
23. Tkachuk P.D. Patent SSSR ot 15.05.1979 g. #662275. Ekstsentrikovyyizazhim. Ivano-Frankovskiyinstitutneftiigaza. – 1979.
24. FavarZh. Kurs lokalnoy differentsialnoy geometrii. M.: Izd-voInostrannoyliteraturyi, 1960 g. p.322.
25. Shahnov V.A. Osnovyikonstruirovaniya v Solid EDGE. Posobiepoproektirovaniyuizdeliy v priborostroenii. M.: DMK Press, 2014. p.272.
26. Dupin Ch. Developpements de geometrie, P., 1813.

## OPPORTUNITIES OF COMPUTER MODELLING DUPIN CYCLIDE

### ASACAMLOCK

Latyshev S. S., Tishchenko I.V., Dronova A.V.

**Summary** DupinCyclide is channel surfaces. It has been known that DupinCyclides are unique surfaces whose focal surfaces are degraded in quadric curve. Focal surfaces consist of center of curvature point set. Two system create two confocal conics. That why any DupinCyclide research has great scientific and engineering meaning. Features and application questions are explored in great depth in papers devoted to DupinCyclide. Varying inventions are designed from DupinCyclide features. Such inventions can be used in geometrical construction with computer technologies application. Application of computer technologies for Dupincyclide modelling is discussed in this paper by example of application in machine construction industry as a cam lock. Choice of Dupincyclide representation is fundamental step of it modelling. Cyclide representation by three sphere, second-order curves and others are represented in this paper. Representation by three sphere can set four Dupincyclides, representation by second-order curves and sphere can set two Dupincyclides, representation by second-order curves and axis of Cyclide can set the only one Dupincyclides. Opportunities and lapse rate of Dupincyclide construction by use of computer technologies are represented in this paper by modelling in program Solid EDGE.

**Materials and methods:** computer modelling program Solid EDGE is used.

**Results:** benchmark analysis of findings detected that relative error of section sizes decreases according to increase of section number was given before surfaces construction.

**Conclusions:** object of research (DupinCyclide) combines opportunity of geometric modelling representation, geometric realization opportunity and practical effect of results obtained in process of computer modelling.

**Key words:** Dupincyclide; surface constructing; second-order curves; computer graphics.



УДК 711.424: (719:904)

## МУЗЕЕФИКАЦИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ В ЧЕРТЕ ГОРОДА

Живица В.В.

Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

Адрес: г. Симферополь, ул. Киевская 181.

E-mail: vzhivisa@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблематика сохранения, популяризации и включения в современную инфраструктуру города руинированных археологических памятников античного периода, проанализированы риски, которым подвергается археологический объект. Рассмотрены примеры решения подобных архитектурно-градостроительных задач в отечественной и зарубежной практике. Выявлены общие принципы и приёмы проведения музеефикации археологических архитектурных памятников в условиях сформировавшейся городской застройки, приёмы музейной экспозиции и презентации архитектурных остатков и артефактов, найденных на территории конкретного памятника. Даны рекомендации для осуществления музеефикации крымских археологических памятников античного периода, находящихся на территории современного города.

**Предмет исследования:** археологические памятники, расположенные в черте города.

**Материалы и методы:** при проведении данного исследования были изучены литературные, научные источники, а также нормативно-правовая база Российской Федерации, Республики Крым и г. Севастополя; осуществлён подбор и анализ теоретических трудов и практических примеров, разработанных отечественными и зарубежными авторами. При анализе полученных данных использованы методы анализа, аналогии, синтеза, дедукции.

**Результаты:** 1. В данной работе рассмотрен термин «музеефикация» и особенности ее осуществления в отношении археологических памятников античного периода, находящихся на территории современных городов.

2. Рассмотрены факторы, в той или иной степени оказывающие влияние на сохранность и музейное использование археологических памятников.

3. Исследованы методы и подходы к организации музеефикационных мероприятий на территории археологических памятников в городской среде. Проанализирован мировой и отечественный опыт сохранения, популяризации и включения в архитектурно-градостроительную среду археологических памятников.

**Выводы:** Данная работа может быть интересна для обучающихся и профессорско-преподавательского состава по специальности 07.03.04 «Градостроительство» и 07.04.04 «Градостроительство», практикующих архитекторов, градостроителей, реконструкторов, археологов, историков, и др.

**Ключевые слова:** объекты археологического наследия в городской среде, охрана объектов культурного наследия, музеефикация.

### ВВЕДЕНИЕ

Объекты археологического наследия важны для изучения прошлого любой территории, а для дописьменных периодов истории являются единственным и исключительным источником. В настоящее время сохранилось малое количество материальных свидетельств быта народов периода античности (IV век до н. э. – IV век н.э.). О том, как жили люди в древние времена, как и где работали, отдыхали, торговали, развлекались, решали административные и прочие вопросы можно судить по архитектурным находкам и руинированным

остаткам, некогда бывшими системой улиц, площадей, жилыми образованиями, административными и культовыми зданиями, составлявшими отдельные архитектурные ансамбли и образ поселения в целом.

Если информация не смогла отложиться в источниках, хрониках и других документах, значит, извлечь ее можно только из археологических объектов: курганов, городищ, крепостей. Поэтому все страны на государственном уровне охраняют свое археологическое наследие, и, достаточно часто – строгими мерами преследования. В Российской Федерации осуществление деятельности в

отношении объектов культурного наследия регулируется Федеральным законом от 25.06.2002 N 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации», за его нарушение предусмотрена уголовная, административная и иная юридическая ответственность [1].

К сожалению, в мире имеется достаточно примеров, когда человеческая жадность, корысть и отсутствие понимания бесценности археологических памятников для культуры народов и стран приводит к невосполнимым утратам.

В 2013 году в Перу, неподалёку от Лимы, строительная компания ради известняка, необходимого для строительства дороги, уничтожила Храм майя - не только саму пирамиду, но и все археологические предметы, скрытые в ней. В том же году рабочие двух компаний по продаже недвижимости снесли 6-метровую пирамиду для того, чтобы освободить элитный земельный участок для застройки. Археологи утверждали, что это сооружение было возведено четыре тысячи лет назад и являлось административным и религиозным центром древней цивилизации, существовавшей здесь ещё до прихода инков. К счастью, общественности и полиции удалось остановить работы по сносу трех других пирамид данного архитектурного комплекса.

В 2007-м году в китайском городе Нанкин при строительстве торгового центра компании «КЕА» были уничтожены гробницы Шестой династии (III-IV веках нашей эры) - грандиозные погребальные сооружения, возведённые из зелёного кирпича, покрытого изображениями лотоса и искусно украшенные гравюрами. Требования историков и археологов о прекращении строительства для раскопок и изучения находок заказчики и строители проигнорировали. Несмотря на значительные штрафы (примерно от \$6,6 тысяч до \$65,7 тысяч) за уничтожение исторического и культурного наследия, в Поднебесной ежегодно стирают с лица земли множество шедевров древней архитектуры.

Дамба Оффа – памятник культуры, датируемый VIII веком нашей эры, пролегает вдоль границы между Англией и Уэльсом и состоит из траншеи и земляного вала, которые чётко просматриваются и в наше время. Её культурная и историческая ценность признана ЮНЕСКО наряду с Великой Китайской стеной. Однако в августе 2013 года во время расширения близлежащей дороги рабочие по незнанию уничтожили часть насыпи.

И, конечно же, ярким примером уничтожения объекта культурного наследия является разрушение античного города Трои немецким предпринимателем Генрихом Шлиманом. Одержимый идеей найти этот легендарный город, Шлиман обнаружил в 1870 году место, соответствующее описанному Гомером большому селению, обнесённому внушительной крепостной стеной. Исследования показали, что за время своего существования город был разрушен и заново отстроен не менее 9 раз. Шлиман предположил, что

истинная «гомеровская» Троя находится в нижних культурных слоях, поэтому верхние более новые руины взрывал динамитом. Уничтожение древних построек остановили лишь после находки золотых драгоценностей, по мнению Шлимана, принадлежавших Елене Троянской. Однако экспертиза показала, что данные артефакты принадлежат к значительно более древнему историческому периоду, что означало безвозвратную утрату Трои, описанной в работах Гомера [2].

Памятники археологии составляют большую часть богатейшего культурного наследия Крыма от эпохи палеолита до средневековья. В Республике Крым на государственной охране состоит 5846 археологических памятников (в т. ч. первобытные стоянки, могильники таврские и эпохи переселения народов, скифские городища и курганы, античные города) [3].

Многие крымские города были основаны в античный период греческими колонистами, привнесшими на полуостров архитектурно-градостроительную культуру своей родины. Естественно, что в процессе развития каждого населенного пункта его структура постепенно трансформируется в зависимости от потребностей жителей, в ходе исторических событий, под воздействием природных стихий, и т.д. Поэтому месторасположение античных поселений иногда не совпадает с границами современного города. Но довольно часто остатки древних сооружений находятся непосредственно на городских территориях, соседствуя с жилыми кварталами и объектами инфраструктуры, или находятся под ними. При этом многие археологические памятники, находящиеся в черте города, несмотря на значительный культурный, исторический, архитектурный, туристический интерес, по ряду причин не экспонируются. В этой связи в настоящее время перед специалистами стоит актуальная задача – сохранение и разумное использование историко-культурного наследия в современном городе.

**Цель исследования:** изучить особенности сохранения, популяризации и музейного экспонирования археологических памятников античного периода, находящихся на территории современного города.

**Задачи исследования:** изучить научные, нормативно-законодательные источники по теме исследования;

- проанализировать особенности осуществления
- рассмотреть понятие «музеефикация», проанализировать существующие методы и подходы к осуществлению работ по сохранению и музейной презентации;

- проанализировать мировой и отечественный опыт осуществления музеефикации археологических памятников античного периода, находящихся в черте города.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Все использованные при подготовке статьи литературные источники соответствуют теме исследования.

1. Основное внимание уделено анализу Федерального закона «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» [1], определяющего задачи государственных органов охраны памятников: контроль за соблюдением законодательства в области охраны, установление ответственности за повреждение или разрушение памятников, подробно определяется механизм правового регулирования права собственности по отношению к объектам культурного наследия и пр.

2. В работе рассмотрены примеры уничтожения уникальных объектов культурного наследия в Турции, Китае, Великобритании и ряде других стран [2].

3. Проанализирована опубликованная в журнале «Материалы по археологии, истории и этнографии Таврии» статистика о численности и качественных характеристиках археологических памятников Крыма [3].

4. Минеева И.М. уделила внимание выделению основных этапов развития взаимоотношений науки, общества и государства при решении вопросов охраны памятников археологии и их музейного использования; рассмотрела теоретические и практические вопросы музейной презентации памятников под открытым небом как составной части их государственной охраны и использования [5].

5. В работе Сухановой Е.А. проведён анализ существующих методов консервации руинированных памятников и оценка их преимуществ и недостатков с точки зрения непосредственной реализации [6].

6. Автором была проанализирована информация о музейной презентации археологических памятников, находящихся в черте города [7-19].

7. Из работы «Музейное дело России» автор статьи использовал определение музеефикации археологических памятников [20].

Таким образом, анализ литературных источников свидетельствует о том, что проблема сохранения и музейной презентации археологических памятников античного периода чрезвычайно актуальна и должна быть изучаема и обсуждаема специалистами в разных сферах деятельности социологами, экономистами, инженерами, технологами и т.д., но в первую очередь градостроителями и архитекторами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использованы методы научного исследования, собраны и упорядочены теоретические и практические материалы, касающиеся

музеефикации археологических памятников, перспектив и особенностей их функционального использования; включения объектов историко-культурного наследия в современную архитектурно-градостроительную среду. При работе над исследованием применены методы теоретического анализа и синтеза, метод аналогии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Федеральный закон «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» определяет объект археологического наследия как «частично или полностью скрытые в земле или под водой следы существования человека в прошлых эпохах (включая все связанные с такими следами археологические предметы и культурные слои), основным или одним из основных источников информации о которых являются археологические раскопки или находки» [1].

К объектам археологического наследия относятся городища, селища, стоянки, остатки древних укреплений, дорог, места совершения древних религиозных обрядов и др., а также культурные слои [1].

Зачастую люди рассматривают археологические памятники поверхностно, воспринимая их как должное и не задумываясь над тем, насколько они подвержены разного рода угрозам – природным, антропогенным и техногенным. В особой защите нуждаются археологические объекты, расположенные в городах, т.к. на них воздействуют все основные виды рисков и вредных воздействий.

В вопросе сохранения археологических объектов, находящихся в черте населённых пунктов, в первую очередь следует учитывать воздействие антропогенных и техногенных факторов:

- обводнение или осушение территории участка памятника и, как следствие, нарушение структуры и физических характеристик грунтов, образование карстовых пустот и др.;
- проведение вблизи памятников земляных работ с рытьем котлованов, прокладкой различных коммуникаций или линий метрополитена; устройство подвалов и колодцев вблизи археологического памятника;
- вибрационное воздействие от транспорта, забивки свай и пр.
- загрязнение почвы и воздуха отходами химических и перерабатывающих предприятий, активно разрушающими строительные материалы памятников археологии
- визуальное загрязнение ландшафта и др. [4].

В целях обеспечения сохранности археологического памятника в его исторической среде на сопряженной с ним территории устанавливаются следующие зоны охраны: охранная зона объекта культурного наследия, зона регулирования застройки и хозяйственной

деятельности, зона охраняемого природного ландшафта [1].

В связи со значительной руинированностью, памятники античного периода могут быть использованы исключительно как объекты исследования и музейного показа. Второй сценарий использования предполагает проведение их музеефикации, т.е. выполнения комплекса работ по максимальному сохранению и выявлению историко-культурной, научной, художественной ценности и включения памятников в современную культуру [20].

В отношении музеефикации археологических памятников важными являются следующие теоретические и методологические положения:

- научная и культурная ценность музеефикации должна быть осознана и принята в общественной среде и государственными органами охраны памятников.

- музеефикация должна основываться на восприятии исторического наследия как результата взаимодействия древней культуры и природной среды в процессе освоения определенной территории, т.е. как части культурного ландшафта.

- музеефикация должна рассматриваться как целостная система мер по выявлению, изучению, восстановлению и музейному показу объектов археологического наследия, нуждающихся в государственной охране.

- для музеефикации археологического наследия региона должна быть выработана единая концепция, основанная на его самобытности, большом культурном и территориальном разнообразии, наличии необходимых ресурсов для создания системы музеефицированных объектов в рамках действующих музейных комплексов и историко-культурных (археологических) территорий [5].

В силу уникальных характеристик каждого античного памятника и набора природных и антропогенных факторов, влияющих на него, невозможно унифицировать методы или

разработать единый подход музеефикации археологического наследия. В каждом конкретном случае состав мероприятий зависит от того, как мы хотим представить посетителям данный архитектурно-градостроительный объект, как сможем преподнести им информацию об объекте и визуализировать её, какие меры обеспечат наилучшую сохранность археологического памятника.

В настоящее время наиболее популярны три метода музейно-консервационной деятельности на городских памятниках археологии: метод «колпака», метод натуральной консервации, реконструктивно-археологическое макетирование.

**Метод «колпака»** - широко используемая и хорошо зарекомендовавшая себя практика музейного экспонирования раскопанного археологического объекта в специально возведенном над ним закрытом помещении. Его преимуществами являются традиционность реставрационной и консервационной методики в отношении отдельных деталей объекта, находящегося в привычных музейных условиях и возможность постоянного доступа к памятнику. Зачастую над особо ценными и хрупкими сооружениями или когда необходимо оставить без изменения объемы и контуры археологических объектов, над ними сооружаются навесы или защитные павильоны.

При всей эффективности данного метода, необходимо учитывать, что современные сооружения над археологическими памятниками, искажают его облик и ту среду, в которой находятся археологические объекты. Поэтому строительство искусственных сооружений должно вестись после тщательного исследования сохраняемых объектов, архитектурные формы павильонов, их размеры, строительные материалы должны быть детально продуманы. А возведение защитных сооружений над археологическими памятниками должно допускаться как крайняя мера, препятствующая уничтожению объекта [6].



**Рис. 1.** Музей Хедмарк Хамар, Норвегия  
**Fig. 1.** Hedmark Hamar Museum, Norway

**Музей Хедмарк Хамар, Норвегия.** Музей, расположенный недалеко от озера Мьеса, представляет собой выставку под открытым небом, дом 18-го века и сад из трав. Однако настоящим украшением музея считаются руины собора, построенного в 1150 году и частично разрушенные в 1567 году. Четыре большие арки, которые сохранились до нашего времени, находятся под парящим колпаком из стекла и стали [7].

**Музей «Колумба» в Кёльне.** Архитектор Петер Цумтор построил музей на месте разрушенной романской церкви Святой Колумбы, удивительным образом объединив руины и современное строение.

Новые стены органично включают в единый ансамбль окружающие обломки: колонны, своды, оконные арки проемов. На первых этажах расположена галерея с руинами оснований римских построек, обломков самой церкви и фрагментов ее стен.

Архитектор нашел прекрасное решение как осветить пространство и не создать при этом преграду в виде оконных проемов между уличной средой и интерьером - спроектировал перфорированную кладку. Через множество мелких отверстий падает рассеянный свет, который как будто идет из стен, создавая эффект витража [8].



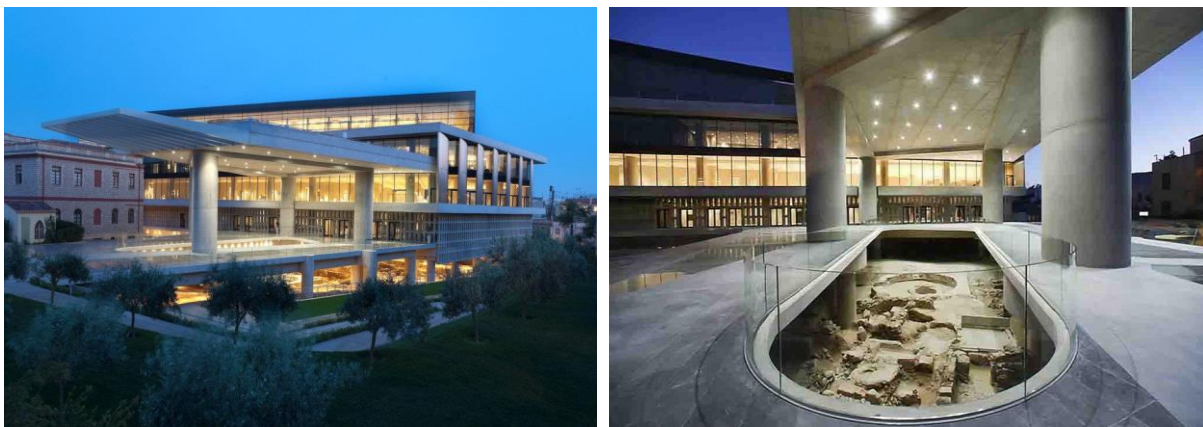
**Рис. 2.** Музей «Колумба» в Кёльне  
**Fig. 2.** The Columbus Museum in Cologne



**Рис. 3.** Интерьер музея «Колумба» в Кёльне  
**Fig. 3.** The interior of the Columbus Museum in Cologne

**Музей Акрополя (Acropolis Museum), Афины, Греция.** Афинский музей Акрополя был открыт для посетителей в 2009-м году. Здание музея выполнено по проекту швейцарского дизайнера Бернара Чуми и занимает площадь в 226 тыс. м<sup>2</sup>, расположен он непосредственно у подножья Акрополя.

В новый музей перемещены большинство объектов античности (барельефы, статуи, артефакты), на постоянной основе действуют выставки, где можно увидеть текущие раскопки склонов Акрополя и древние экспонаты [9].

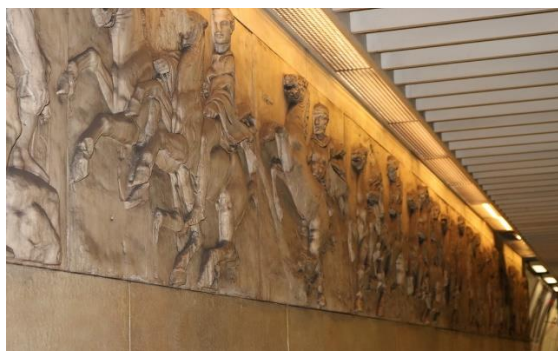


**Рис. 4.** Музей Акрополя (Acropolis Museum), Афины, Греция  
**Fig. 4.** Acropolis Museum, Athens, Greece

**Афинский метрополитен. Станция-музей Монастираки 1.** Во время строительства станции было обнаружено множество исторических объектов: мастерские V в. до н.э. для покрытия статуй медной позолотой, кладбище, захоронения которого датируются с микенского периода до Византии, термы римского периода, часть

водопровода, русло реки Эридан, а также древний путь, который вел от Длинных стен в дельте Месогии.

Одна из стен станции открывает исторический разрез, закрытый стеклом, с раннехристианским захоронением. Некоторые древние предметы выставлены на обозрение в застекленных нишах [10].



**Рис. 5.** Афинский метрополитен. Станция-музей Монастираки 1  
**Fig. 5.** The Athens Metro. Station-Museum of Monastiraki 1

**Плаза-де-ла-Энкарнасьон** в Севилье украшает очень примечательное сооружение – Metropol Parasol, это уникальное строение является одной из самых больших деревянных конструкций в мире.



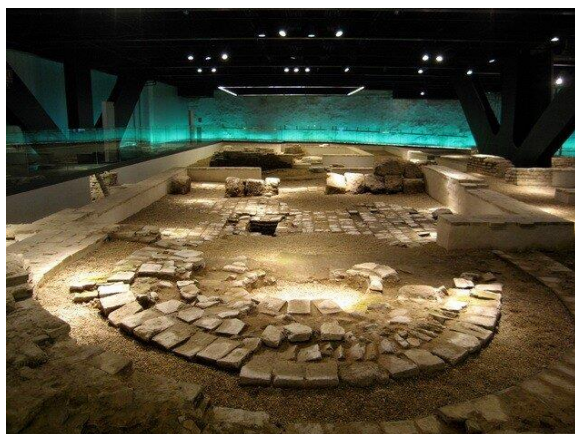
**Рис. 6.** Плаза-де-ла-Энкарнасьон в Севилье с высоты птичьего полёта  
**Fig. 6.** Plaza de la Encarnación in Seville aerial view



**Рис. 7.** Плаза-де-ла-Энкарнасьон в Севилье  
**Fig. 7.** Plaza de la Encarnacion in Seville

В начале 21 века на этом месте собрались строить гаражи. Однако предварительные археологические раскопки показали, что прежде здесь было древнеримское поселение, и это в корне поменяло будущее предназначение места – тут

задумали создать археологический музей, а с ним и целый комплекс: ресторан, небольшой рынок, прогулочные дорожки на крыше и видовую террасу [11].



**Рис. 8.** Плаза-де-ла-Энкарнасьон в Севилье. Археологический музей  
**Fig. 8.** Plaza de la Encarnación in Seville. Archaeological Museum

**Метод натуральной консервации** обеспечивает внесение как можно меньших изменений в открытую при раскопках археологическую, архитектурную и стратиграфическую ситуацию. При использовании данного метода объект фиксируется физико-химическими или строительными консервационными способами на возможно длительный срок для демонстрации зрителям. Метод наиболее приемлем при музеефикации археологических руинных остатков.

Следует учитывать, что данный способ имеет и негативные стороны: консервирующие материалы, имеющиеся у строителей и химиков, несовершенны, а повторные пропитки и перекладки зачастую ведут к уничтожению архитектурно-археологического объекта. Поэтому, если обеспечить надежную

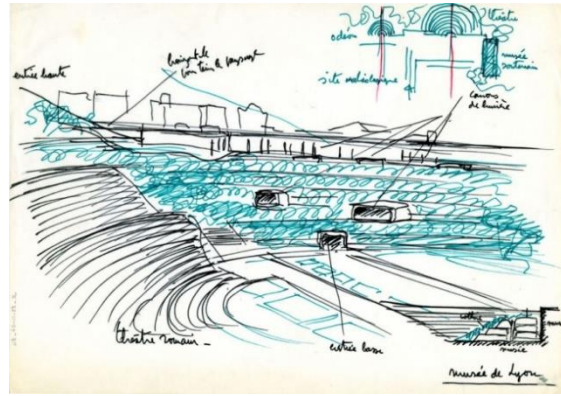
консервацию объекта не представляется возможным, лучше просто засыпать раскоп.

Археологические руины, долгое время пребывающие под землей, после их раскрытия подвергаются быстрому разрушительному воздействию окружающей среды и нуждаются в оперативном закреплении. При этом каждый вид строительного материала и даже закрепление остатков из одного и того же вида строительного материала требуют собственной методики консервации [6].

**Галло-романский музей в Лионе** располагает большой коллекцией ценных археологических находок периода поздней Римской империи. Римские театры, лишившись стен, сохранили лишь врезанные в склон каваи и часть субструкций, поэтому стали похожи на греческие.



**Рис. 9.** Галло-романский музей в Лионе  
**Fig. 9.** Gallo-Roman Museum in Lyon



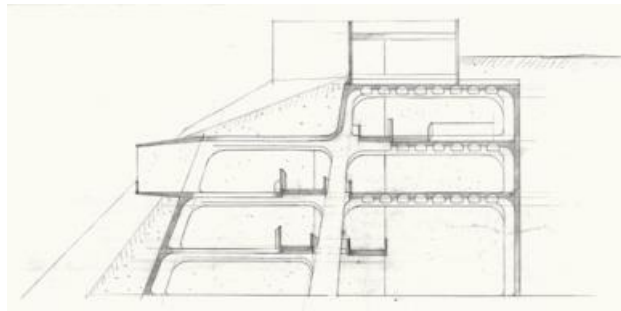
**Рис. 10.** Бернар Зерфюс. Набросок внешнего вида Музея Галло-римской цивилизации. Fonds Bernard Zehrfuss. Académie d'architecture/Cité de l'architecture & du patrimoine/Archives d'architecture du XXe siècle  
**Fig. 10.** Bernard Serfus. A sketch of the appearance of the Museum of the Gallo-Roman civilization. Fonds Bernard Zehrfuss. Académie d'architecture / Cité de l'architecture & du patrimoine / Archives d'architecture du XXe siècle

Недалеко от театров был построен музей, открытый в 1975 году. Архитектору Бернару Зерфюсу, отвечающего за проектирование, была предоставлена свобода выбора места для нового здания. Вначале его хотели разместить на участке за сценами театров. Но в этом случае здание музея

перекрыло бы красивый вид на город. Кроме того было бы сложно вписать крупный объем нового строения в античный ансамбль. Поэтому Зерфюс предложил оригинальное решение – заглубить музей в землю, в боковой склон холма, оставив на поверхности лишь верхний уровень с террасой.



**Рис. 11.** Галло-романский музей в Лионе  
**Fig. 11.** Gallo-Roman Museum in Lyon



**Рис. 12.** Музей Галло-римской цивилизации. Разрез ©. Fonds Bernard Zehrfuss. Académie d'architecture/Cité de l'architecture & du patrimoine/Archives d'architecture du XXe siècle  
**Fig. 12.** Museum of the Gallo-Roman civilization. Section ©. Foundations Bernard Serfuss. Academy of Architecture / Cité de l'architecture and patriotism / Archives d'architecture of the 20th century

В музее созданы все условия для максимально удобного расположения выставок, позволяющее обозреть экспонаты вблизи, а некоторые масштабные работы (мозаики) – сверху. Несмотря на то, что все семь этажей музея находятся под землей внутри склона, посетители могут видеть наземные памятники античности через специальное смотровое окно [12].

**Древнеримские развалины в Лондоне.** Фрагменты древних городских улиц времен Римской империи были обнаружены во время строительства новой штаб-квартиры корпорации Bloomberg в центре лондонского Сити. Площадь, которую занимают сооружения, превышает 10 тыс. м<sup>2</sup>. Ученые считают, что город основан римлянами в 47 году н.э.



**Рис. 13.** Древнеримские развалины в Лондоне  
**Fig. 13.** Ancient Roman ruins in London

Наряду с древними постройками было найдены предметы быта, прекрасно сохранившиеся благодаря болотистой местности. Общее количество артефактов превысило 10 000 предметов.

Все находки были переданы на хранение в Музей Лондона, после чего на месте раскопок продолжилось строительство. В штаб-квартире

Bloomberg будет создана экспозиция, в которую войдет часть артефактов [13].

**Древние руины в районе Монастираки, Афины.** Район Монастираки - старейший район греческой столицы, он расположен в самом центре города и над ним открывается северная часть Акрополя.



**Рис. 14.** Древние руины в районе Монастираки, Афины  
**Fig. 14.** Ancient ruins in the area of Monastiraki, Athens

Раскопки Римской Агоры и библиотека Адриана, в давние времена служившая местом хранения книг, а также размещавшая на своей территории живописный сад и бассейн [14].

**Кернаве** – небольшой городок, расположенный на правом берегу реки Нерис в 35 км от Вильнюса. В средние века он был одним из первых центров

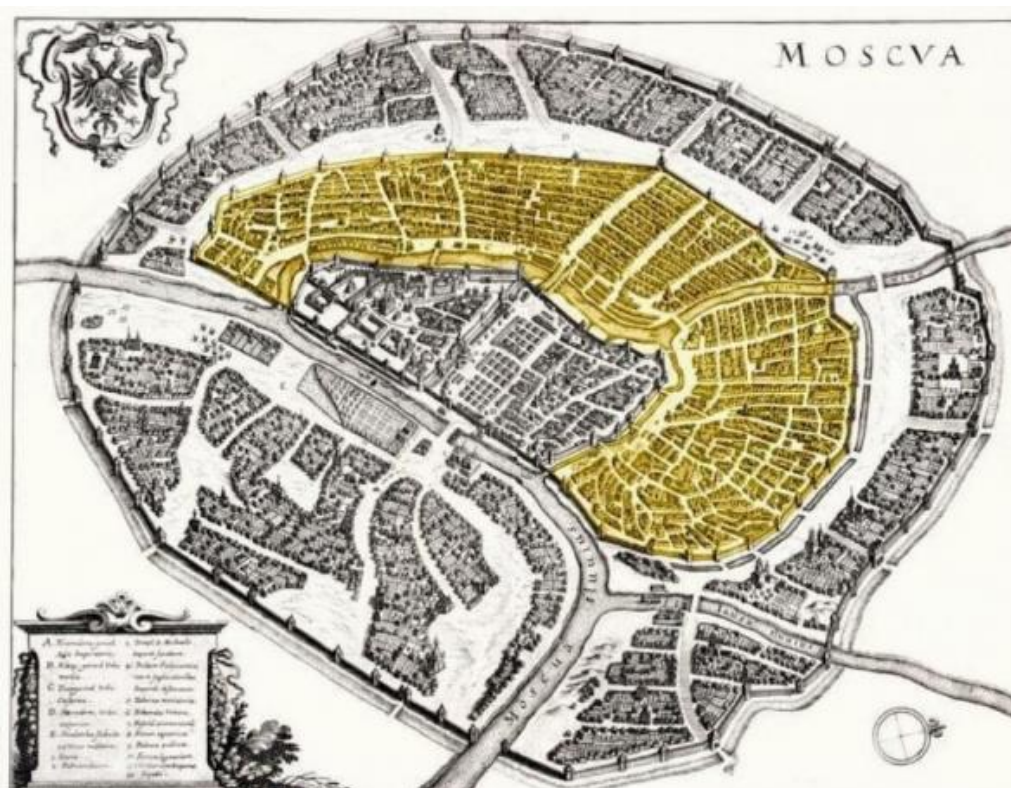
Литовского государства. В 1989 году был учрежден Государственный культурный резерват Кернаве. В 2004 году Кернаве внесено ЮНЕСКО в список Всемирного наследия. Исключительное мировое значение этого объекта – в продолжительности заселенности от позднего палеолита (IX тысячелетие до Р.Х.) до наших дней [15].



**Рис. 15.** Кернаве. Литва  
**Fig. 15.** Kernave. Lithuania

**Фрагмент стены Белого города на Хохловской площади в Москве.** Белгородская стена - одна из крепостных стен Москвы, окружавшая Белый город в 16-18 веках. Ее

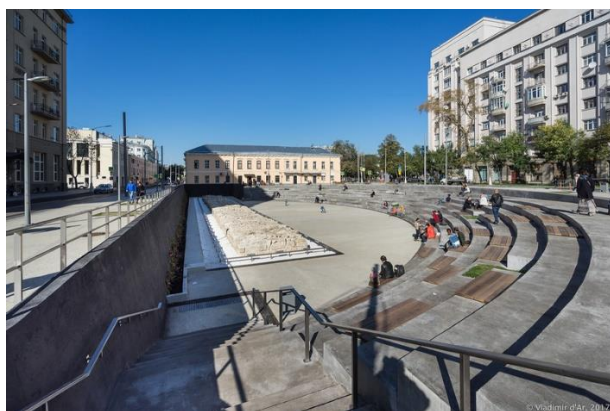
расчищенный участок - уникальный исторический артефакт, музеефицированный памятник археологии федерального значения.



**Рис. 16.** Карта Белого город в Москве  
**Fig. 16.** Map of the White City in Moscow

В 2007 году при строительстве на Хохловской площади торгового центра с подземной парковкой был обнаружен большой, отлично сохранившийся фрагмент фундамента Белгородской стены. Было решено музеефицировать руину путём создания

археологического парка под открытым небом. В 2017 году площадь благоустроили по проекту французских архитекторов: её сделали двухуровневой, вокруг фрагмента стены возвели амфитеатр.



**Рис. 17.** Фрагмент стены Белого города на Хохловской площади в Москве  
**Fig. 17.** Fragment of the walls of the White City on Khokhlovskaya Square in Moscow

Чтобы фрагмент не разрушался от погодных воздействий, выполнили его консервацию с обработкой специальным составом, а площадь вокруг выложили покрытием, которое хорошо пропускает воду и быстро просыхает.

Обзору доступна лишь верхняя часть артефакта: основная часть кладки по-прежнему заглублена в землю на 0,6-1,5 метра. Тем не менее, видимые габариты руины позволяют представить истинные масштаб и размеры Белгородской стены. Если до музеефикации это можно было сделать лишь мысленно, то теперь есть возможность увидеть на живом примере [16].

Метод **реконструктивно-археологического макетирования** позволяет восстановить утраченный, но реконструируемый по

сохранившимся деталям объект на его прежнем месте. Воссоздание осуществляется из того же материала с использованием не только сохранившихся элементов, но и другой информации о данном объекте (описания, чертежи, аналоги и т.д.). В рамках данного метода наиболее древние части памятников архитектуры, выявленные при раскопках, консервируются и экспонируются в перекрытых траншеях, подвалах и т.д. [6].

Греко-скифское городище Кара-Тобе. Реплика скифской усадьбы, что была построена в первом веке до нашей эры. Это один из наиболее интересных объектов, входящих в состав экскурсии, так как он был создан по образцам скифских сооружений и с соблюдением тех методик, что использовались скифами [17].



**Рис. 18.** Греко-скифское городище Кара-Тобе. Реплика скифской усадьбы  
**Fig. 18.** Greco-Scythian settlement Kara-Tobe. Replica of the Scythian estate

Особого режима организации работы требуют **музей-заповедники и музеи под открытым небом** на основе археологических памятников.

Этот режим предусматривает комплексную реализацию ряда организационно-технических мероприятий:

- 1) вычленение территории музея-заповедника из сферы городской застройки;
- 2) определение охранных зон, в том числе вокруг музея-заповедника, зоны регулирования застройки, хозяйственной деятельности, зоны охраняемого ландшафта;

3) возведение защитных сооружений, проведение консервационно-реставрационных работ, строительство или приспособление существующих помещений для размещения музейной экспозиции и фондов [18].

**Историко-археологический музей-заповедник Неаполь Скифский. Республика Крым, г. Симферополь.** Неаполь Скифский – древний город, одна из скифских царских крепостей в Крыму, столица позднескифского государства (III век до н. э. — III век н. э.). Является объектом культурного наследия федерального значения [19].



**Рис. 19.** Историко-археологический музей-заповедник Неаполь Скифский  
**Fig. 19.** Historical and Archaeological Museum-Reserve Naples Scythian

## ВЫВОДЫ

1. В данной работе рассмотрен термин «музеефикация» и особенности ее осуществления в отношении археологических памятников античного периода, находящихся на территории современных городов.

2. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на сохранность и музейное использование археологических памятников

3. Исследованы методы и подходы к организации музеефикационных мероприятий на территории археологических памятников в городской среде. Проанализирован мировой и отечественный опыт сохранения, популяризации и включения в архитектурно-градостроительную среду археологических памятников.

На основании проведенного анализа можно выделить ряд рекомендаций по осуществлению музеефикации археологических памятников, расположенных в черте города:

- соблюдение режима использования территории памятника в зонах охраны;
- максимальное сохранение археологического памятника при восстановительных работах;
- использование материалов, строительных приемов и конструкций, не искажающих историческую подлинность объекта;
- маркировка цветом или условными обозначениями современных дополнений в аутентичные фрагменты зданий и сооружений;
- сохранение природного окружения археологического памятника (по возможности);
- создание архитектурно-градостроительной среды поддерживающей концепцию памятника, помогающей его презентации и восприятию;
- сохранение визуальных связей, запрет на размещение рекламных вывесок, препятствующих восприятию археологического памятника.
- размещение в пешеходной доступности от археологического памятника объектов туристического обслуживания (магазины, предприятия общественного питания, объекты для временного проживания, кассы, парковки, санузлы, садово-парковые объекты и пр.).

Независимо от того, какой метод экспонирования археологического памятника будет избран, он должен обеспечивать бережное отношение к памятнику истории и культуры и уважение к посетителям музеефицированного объекта.

Следует осуществлять поддержку археологических памятников в том виде, в котором они дошли до нас. Тогда эти объекты станут привлекательными для посетителей своей достоверностью, подлинностью и информативностью. Для подачи более полных сведений об объекте, рядом с ним в экспозиционном павильоне можно располагать карты, схемы, макеты-реконструкции, краткие исторические справки и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 25.06.2002 N 73-ФЗ (ред. от 21.02.2019) "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации" [Электронный источник] / <https://base.garant.ru/77668279/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)
2. Артефакты древности, уничтоженные глупостью и невежеством. Удивительное [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://udivitelnoe.temaretik.com/1045663160119855934/artefakty-drevnosti-unichtozhennyye-glupostyu-i-nevezhestvom/#/> , открытый (дата обращения: 19.06.19)
3. Материалы по археологии, истории и этнографии Таврии. №23 [Текст] // Под ред. А.И. Айбабина. – Симферополь: Соло-Рич, 2018. – 807 с.: ил.
4. Studfiles. Диагностика причин деформаций и разрушений памятников архитектуры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3547135/page:25/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)
5. Сохранение, использование и государственная охрана археологического наследия Южного Урала во второй половине XIX - начале XXI вв. тема диссертации и автореферата по ВАК

РФ 07.00.02, доктор исторических наук Минева, Ияна Маратовна 2010 Москва

6. Суханова Е.А. Методика консервации руин в реставрационной практике (на примере памятников Татарстана) [Текст] / Е.А. Суханова / Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XXVIII междунар. науч.-практ. конф. № 11(24). – Новосибирск: СибАК, 2013.

7. vv-travel Hedmark Museum [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vv-travel.ru/tarticlle/hedmark-museum>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

8. Архитектурный вестник. Музей на руинах [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://archvestnik.ru/2008/04/28/muzej-na-ruinah/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

9. Культурный туризм. Музей Акрополя [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tuorism.ru/europe/greece/afiny/dostoprimechateIhnosti-afiny/muzejj-akropolya/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

10. Greek.ru. Археологические находки в Афинском метро [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.greek.ru/news/exclusive/36890/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

11. Культурный комплекс Metropol Parasol [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ispaniagid.ru/metropol-parasol/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

12. Archi.ru. Музей Галло-римской цивилизации в Лионе [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://archi.ru/world/61242/muzei-gallo-rimskoi-civilizacii- v-lione>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

13. В центре Лондона найдены руины древнего города [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://geno.ru/news/6955/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

14. Монастираки города [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://travels.co.ua/rus/greece/athens/monastiraki/index.html>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

15. Памятники культурного резервата Кярнаве / Kernavė Archaeological Site [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://turbina.ru/guide/Kyarnave-Litva-136273/Otzyvy/Tchto-delat-dostoprimechatelnosti/Arkhitektura-Pamyatniki/3/0/Pamyatniki-kulturnogo-rezervata-Kyarnave-48963/Otzyv/Kulturnyy-rezervat-Kyarnave-pamyatnik-YuNESKO-1137-76591/>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

16. Фрагмент стены Белого города на Хохловской площади [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://mosprogulka.ru/places/stena\\_belogo\\_goroda\\_hohlovskaja\\_ploshad](http://mosprogulka.ru/places/stena_belogo_goroda_hohlovskaja_ploshad), открытый (дата обращения: 19.06.19)

17. Кара-Тобе греко-скифское городище [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://krymoteka.com/kara-tobe-greko-skifskoe-gorodische.html>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

18. Pandia. Археологическое наследие [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/82/061/44081.php>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

19. Историко-археологический заповедник Неаполь-Скифский [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.visitcrimea.guide/gostyam-kryma/chto-posmotret/item/221-istoriko-arkheologicheskij-zapovednik-neapol-skifskij>, открытый (дата обращения: 19.06.19)

20. Коссовой И.М., Музейное дело России [Текст] // Под ред. Каулен М.Е. (отв. редактор), И.М. Коссова, А.А. Сундиева. – М.: Издательство «ВК», 2003. -614 с.

## REFERENCES

1. Federal'nyj zakon ot 25.06.2002 N 73-FZ (red. ot 21.02.2019) "Ob ob'ektah kul'turnogo naslediya (pamyatnikah istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii" [Elektronnyj istochnik] / <https://base.garant.ru/77668279/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

2. Artefakty drevnosti, unichtozhennye glupost'yu i nevezhestvom. Udivitel'noe [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://udivitelnoe.temaretik.com/1045663160119855934/artefakty-drevnosti-unichtozhennye-glupostyu-i-nevezhestvom/#/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

3. Materialy po arheologii, istorii i etnografii Tavrii. №23 [Tekst] // Pod red. A.I. Ajbabina. – Simferopol': Solo-Rich, 2018. – 807 s.: il.

4. Studfiles. Diagnostika prichin deformacij i razrushenij pamyatnikov arhitektury [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://studfiles.net/preview/3547135/page:25/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

5. Sohranenie, ispol'zovanie i gosudarstvennaya ohrana arheologicheskogo naslediya YUzhnogo Urala vo vtoroj polovine XIX - nachale XXI vv. tema dissertacii i avtoreferata po VAK RF 07.00.02, doktor istoricheskikh nauk Mineeva, Iyana Maratovna 2010 Moskva

6. Suhanova E.A. Metodika konservacii ruyn v restavracionnoj praktike (na primere pamyatnikov Tatarstana) [Tekst] / E.A. Suhanova / Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike: sb. st. po mater. XXVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. № 11(24). – Novosibirsk: SibAK, 2013.

7. vv-travel Hedmark Museum [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://vv-travel.ru/tarticlle/hedmark-museum>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

8. Arhitekturnyj vestnik. Muzej na ruinah [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://archvestnik.ru/2008/04/28/muzej-na-ruinah/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

9. Kul'turnyj turizm. Muzej Akropolya [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://tuorism.ru/europe/greece/afiny/dostoprimechateIhnosti-afiny/muzejj-akropolya/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

10. Greek.ru. Arheologicheskie nahodki v Afinskom metro [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.greek.ru/news/exclusive/36890/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

11. Kul'turnyj kompleks Metropol Parasol [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://ispaniagid.ru/metropol-parasol/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

12. Archi.ru. Muzej Gallo-rimskoj civilizacii v Lione [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://archi.ru/world/61242/muzei-gallo-rimskoi-civilizacii-v-lione>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

13. V centre Londona najdeny ruiny drevnego goroda [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://geno.ru/news/6955/>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

14. Monastiraki goroda [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://travels.co.ua/rus/greece/athens/monastiraki/index.html>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

15. Pamyatniki kul'turnogo rezervata Kyarnave / Kernavė Archaeological Site [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: [https://turbina.ru/guide/Kyarnave-Litva-136273/Otzyvy/Tchto-delat-dostoprimechatelnosti/Arkhitektura-Pamyatniki/3/0/Pamyatniki-kulturnogo-rezervata-](https://turbina.ru/guide/Kyarnave-Litva-136273/Otzyvy/Tchto-delat-dostoprimechatelnosti/Arkhitektura-Pamyatniki/3/0/Pamyatniki-kulturnogo-rezervata-Kyarnave-48963/Otzyv/Kulturnyy-rezervat-Kyarnave-pamyatnik-YuNESKO-1137-76591/)

Kyarnave-48963/Otzyv/Kulturnyy-rezervat-Kyarnave-pamyatnik-YuNESKO-1137-76591/, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

16. Fragment steny Belogo goroda na Hohlovskoj ploshchadi [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: [http://mosprogulka.ru/places/stena\\_belogo\\_goroda\\_hohlovskaja\\_ploshad](http://mosprogulka.ru/places/stena_belogo_goroda_hohlovskaja_ploshad), otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

17. Kara-Tobe greko-skifskoe gorodishche [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://krymoteka.com/kara-tobe-greko-skifskoe-gorodische.html>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

18. Pandia. Arheologicheskoe nasledie [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://pandia.ru/text/82/061/44081.php>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

19. Istoriko-arheologicheskij zapovednik Neapol'-Skifskij [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.visitcrimea.guide/gostyam-kryma/chtoposmotret/item/221-istoriko-arkheologicheskij-zapovednik-neapol-skifskij>, otkrytyj (data obrashcheniya: 19.06.19)

20. Kossovoj I.M., Muzejnoe delo Rossii [Tekst] // Pod red. Kaulen M.E. (otv. redaktor), I.M. Kossova, A.A. Sundieva. – M.: Izdatel'stvo «VK», 2003. -614 s.

## THE MUSEUMIFICATION OF ARCHAEOLOGICAL MONUMENTS IN THE CITY

Jivitsa V.V.

**Summary.** The article considers the problems of preservation, popularization and inclusion in the modern infrastructure of the city of ruined archaeological monuments of the ancient period, analyzes the risks to which the archaeological site is exposed. Examples of solving such architectural and urban planning problems in domestic and foreign practice are considered. The identified General principles and methods of conducting museumification of archeological and architectural monuments in conditions of the formed urban development, methods of Museum exhibitions and the presentation of the architectural remains and artifacts found on the territory of a concrete monument. Recommendations for the implementation of museumification of the Crimean archaeological monuments of the ancient period, located on the territory of the modern city.

**Subject of research:** archaeological sites located within the city.

**Materials and methods:** in carrying out this study, literature, scientific sources, as well as the legal framework of the Russian Federation, the Republic of Crimea and Sevastopol were studied; selection and analysis of theoretical works and practical examples developed by domestic and foreign authors were carried out. Methods of analysis, analogy, synthesis, deduction were used in the analysis of the obtained data.

**Results:**

1. In this paper, the term "museumification" and features of its implementation in relation to archaeological monuments of the ancient period, located on the territory of modern cities.
2. The factors that influence the preservation and Museum use of archaeological monuments to a greater or lesser extent are considered.
3. The methods and approaches to the organization of Museum activities on the territory of archaeological monuments in the urban environment. The world and domestic experience of preservation, popularization and inclusion in the architectural and urban environment of archaeological monuments is analyzed.

**Conclusions:** This work may be interesting for students and faculty in the specialty 07.03.04 "urban planning" and 07.04.04 "urban planning", practicing architects, urban planners, reenactors, archaeologists, historians, etc.

**Key words:** objects of archaeological heritage in the urban environment, protection of cultural heritage, museumification.

## Раздел 2. Строительство

УДК 66.018.8

### ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ, ХЛОРИДНОЙ И СУЛЬФАТНОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А.

ФГБОУ ВО «ИВГПУ», 153000, Иваново, Шереметевский проспект, д. 21,  
e-mail: varrym@gmail.com, e-mail: azidplumbum00@mail.ru, e-mail: sl79066171227@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные виды коррозии бетонных и железобетонных конструкций, выявляемые при обследовании технического состояния зданий и сооружений. Описаны основные полевые и лабораторные методы определения наиболее встречающихся видов коррозии цементных бетонов: карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии. Обосновано применение данных методов диагностики при обследовании строительных конструкций реальных объектов, а также обозначены дальнейшие перспективы совершенствования средств коррозионного мониторинга. Представленная работа является результатом многолетних обследований зданий и сооружений в Московской, Ивановской и прочих областей Центрального федерального округа, Сахалинской области, Якутии, республики Коми и др.

**Предмет исследования:** предметом исследования являются основные виды коррозии бетонных и железобетонных конструкций: карбонизация, хлоридная и сульфатная коррозии.

**Материалы и методы:** проанализированы методы и средства коррозионного мониторинга, а именно метод фенолфталеиновой пробы и титриметрические методы.

**Результаты:** обосновано применение различных методов диагностики коррозионных повреждений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений, а также дальнейшие перспективы и возможности их улучшения и дополнения.

**Выводы:** аргументирована актуальность решения задачи совершенствования методов коррозионного мониторинга на реальных объектах.

**Ключевые слова:** карбонизация, хлоридная коррозия, сульфатная коррозия, нитрат серебра, хлорид бария.

### ВВЕДЕНИЕ

При обследовании бетонных и железобетонных строительных конструкций зданий и сооружений необходимо обращать внимание на признаки их повреждения вследствие коррозии, такие как: оголение и корродирование стальной арматуры,

нарушение и разрушение защитного бетонного слоя, поверхностное вымывание цементного камня и т.д (рис.1). Данные коррозионные разрушения представляют значительную опасность, поскольку снижают несущую способность и устойчивость всей конструкции, особенно в вертикальных сжатых и горизонтальных изгибаемых системах [1]



**Рис. 1.** Разрушение защитного бетонного слоя, оголение и коррозия арматуры железобетонных опорных конструкций площадки градирни в Пермском крае  
**Fig.1.** Destruction of the protective concrete layer, exposing and corrosion of reinforcement of reinforced concrete supporting structures of the cooling tower in the Perm region

В настоящее время наиболее распространёнными видами химической коррозии бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений при их обследовании являются карбонизация, хлоридная и сульфатная коррозия. На практике, несколько видов коррозии способны действовать совместно, усиливая друг друга, например, часто встречаются сочетания карбонизации и хлоридной коррозии, сульфатной и хлоридной коррозии. Все эти процессы связаны главным образом с неспособностью цементного камня длительное время противостоять агрессивным карбонат-ионам, хлорид и сульфат-ионам, содержащимся в грунтовых и поверхностных водах [2].

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Безусловно, положительная динамика по уменьшению коррозии строительных конструкций может быть обеспечена за счет расширения применения методов коррозионного контроля. Своевременное решение задач по сохранению и защите от разрушения зданий и сооружений различного назначения требует наличия достоверной информации о процессе коррозии в режиме реального времени. К настоящему времени широко известны следующие методы измерений коррозионных потерь (полевые и лабораторные): визуальные, весовые, электрические, физические и аналитические [3-5, 10]. По отдельности все эти методы малоэффективны (за исключением аналитических методов) и не отвечают требованиям высокой точности и достоверности получаемых результатов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На сегодняшний день основным доступным полевым методом выявления карбонизации остается метод фенолфталеиновой пробы. К использованию допускаются 1%, 0,5% и 0,1% растворы фенолфталеина в этиловом спирте, приготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ 4919.1-2016 и ГОСТ 18300-87. Сущность метода заключается в изменении окраски кислотно-основного индикатора (фенолфталеина) на поверхности бетона и железобетона в зависимости от показателя pH его среды. При значении pH нормального бетона ( $pH > 10,5 \div 11$ ) окраска фенолфталеина бесцветная (рис.2, а). В диапазоне значений pH от  $8 \div 10$  отмечается изменение окраски раствора индикатора от бесцветной к малиновой (рис.2, б) [5,6]. Регистрация водородного показателя pH проводилась с помощью pH-метра Testo 206 PH2 (свидетельство о поверке №16613).

С целью определения хлоридов в лабораторных условиях использовался метод титрования

раствором азотнокислого серебра с последующим осаждением (аргентометрическое определение хлоридов по методу Мора) по РД 52.24.407-2006. «Массовая концентрация хлоридов в водах. Методика выполнения измерений аргентометрическим методом». Метод основан на осаждении хлоридов раствором нитрата серебра ( $AgNO_3$ ), в присутствии хромата калия ( $K_2CrO_4$ ).

Для определения сульфатов пользовались титриметрическим методом. В этом методе титрование проводится растворами солей бария, в основном хлоридом бария, по ГОСТ 31940-12 с использованием трилона Б (диапазон измерений от 25 до  $500 \text{ мг/дм}^3$ ), в присутствии 2%-го раствора нитрата серебра (для связывания хлорид-ионов). В качестве индикатора применяется эриохром черный Т.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На основании многолетних обследований зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения (в том числе и линейных объектов), проводимых авторами данной статьи, коррозионная деструкция бетонных и железобетонных конструкций в основном представлена тремя видами: карбонизация, хлоридная и сульфатная коррозия.

В общем виде карбонизация представляет собой процесс нейтрализации основного компонента цементного камня – «свободного гидроксида кальция» (по терминологии академика РААСН С.В. Федосова), с последующим снижением величины показателя pH бетона (ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний»).

Нейтрализация осуществляется насыщением пор бетона углекислым газом из воздуха, что ведет к образованию карбоната кальция, по реакции (1):



Образующийся карбонат кальция обладает пониженным значением показателя pH по сравнению с нормальным бетоном, что приводит к утрате пассивирующего действия бетона на стальную арматуру и её дальнейшей коррозии (особенно во влажной среде) [2]. В ходе определения технического состояния железобетонной пространственной балки перекрытия моста в г. Москва методом фенолфталеиновой пробы были выявлены очаги коррозии. Использовался 1% раствор фенолфталеина в этиловом спирте, приготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ 4919.1-2016 и ГОСТ 18300-87. На рис. 2 и 3 представлены результаты экспериментальных испытаний. При значении  $pH < 8$  изменение окраски фенолфталеина не зафиксировано (рис.2, а), в то время как при  $pH > 8$  раствор индикатора приобрел малиновый окрас (рис.2, б) [5,6].



**Рис.2.** Результаты испытаний методом фенолфталеиновой пробы:

а) отсутствие изменения окраски раствора фенолфталеина; б) изменение окраски раствора фенолфталеина.

**Fig.2.** Test results of method fenolphthalein-test:

a) no change in color of phenolphthalein solution; б) color change of phenolphthalein solution.

Интенсивное окрашивание индикатора на поверхности (и в глубинных слоях) способствует выявлению очагов карбонизации и делает возможным определение их глубины. Некоторые специалисты определяют фиолетовый (малиновый) окрас бетона как реакцию на нормальный бетон (участки некарбонизированного бетона), однако, это не совсем корректно в данном случае, поскольку у нормального (некарбонизированного) бетона ( $pH=11,5\div 12,5$ ) [7, 8] малиновый окрас также будет отсутствовать вследствие его высокой щелочности (предел  $pH$  для изменения окраса фенолфталеина составляет  $8\div 10$ ). Поэтому правильнее будет сказать, что у нормального (некарбонизированного) бетона по визуальным признакам малиновый окрас говорит о начале карбонизации (деградации цементного камня), а у повреждённого и значительно изношенного бетона по визуальным признакам отсутствие малинового окраса говорит уже о завершившейся карбонизации.

Метод фенолфталеиновой пробы считается как полевым, так и лабораторным методом, поскольку раствор фенолфталеина можно взять не только непосредственно на обследовании зданий, но и применять в лаборатории на отобранных из конструкций ядрах или добавлением в дистиллированную воду, в которой предварительно были вымочены отобранные бетонные образцы. Метод фенолфталеиновой пробы не позволяет с высокой степенью точности определить степень и глубину карбонизации, поскольку пороговые значения  $pH$  бетона, при котором он теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре различны в зависимости от конкретных условий эксплуатации и вида бетона, а также вследствие наличия только одного диапазона  $pH$  у данного индикатора [9]. Таким образом, для улучшения точности и достоверности метода фенолфталеиновой пробы необходимо применять

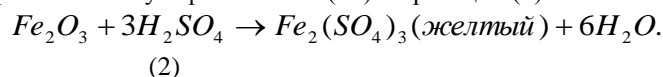
как минимум ещё один кислотно-основный индикатор (совместно с фенолфталеином), а желательно группу индикаторов, которые интенсивно изменяют окраску при значениях  $pH < 8$  и значениях выше 11. К таким индикаторам относятся, например, нейтральный красный (интервал  $pH$   $6,8\div 8,0$ ), бромтимоловый синий (интервал  $pH$   $6,0\div 7,6$ ), малахитовый зелёный (интервал  $pH$   $11,5\div 13,2$ ) и др. (ГОСТ 4919.1-2016). Следует отметить, что к применению наиболее рекомендуются индикаторы, не содержащие в своем составе галогенов, для обеспечения защиты арматуры от негативного влияния различных галоген-ионов. Применение дополнительных индикаторов позволит с высокой степенью точности в полевых условиях определять карбонизацию бетона.

В полевых условиях при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений наиболее трудоёмким является определение хлорид и сульфат-ионов. Сульфат и хлорид-ионы являются наиболее распространёнными и содержатся во всех типах поверхностных вод. Конечно, при наличии мобильной испытательной химической лаборатории представляется возможным определить данные анионы. Речь идёт об определении данных ионов без наличия всего необходимого оборудования (т.е. экспресс-методом). Кислотно-основные индикаторы, такие как лакмус, метилоранж, малахитовый зелёный и другие неспособны дать ясное представление о наличии участков действия хлоридных и сульфатных сред на бетон, несмотря на явно выраженную кислотность данных сред. Это объясняется высокой щелочностью бетона и растворимостью хлоридов и сульфатов [8].

В практике обследования возможно и визуальное определение сульфатов, по наличию характерных желтых «цветных» высолов в местах

совместного корродирования бетона и арматуры, представленные на рис.3 (зафиксированы при обследовании объекта незавершенного строительства в Московской области), однако, подобного определения зачастую недостаточно и необходимо получение точных значений

концентраций содержащихся сульфат-ионов. Высолы подобного цвета обусловлены образованием сульфата железа (III) по реакции (2):



**Рис.3.** Образование характерных сульфатных высолов на железобетонной конструкции

**Fig.3.** The characteristic formation of sulfate scurf on concrete structures

Также визуальное определение сульфатов в бетоне возможно проводить высаливанием сульфата бария на поверхности, применяя растворы солей бария.

Единственным доступным полевым средством является проверка индикаторного окрашивания проб грунтовых и поверхностных вод, вблизи обследуемых конструкций. В данном случае окрашивание проб даёт представление о величине их pH-показателя и позволяет определить кислотность среды. Подобную информацию (величину pH поверхностных и грунтовых вод) можно с лёгкостью получить, используя портативные поверенные и сертифицированные pH-метры (рис. 4). Именно поэтому точное определение хлоридов и сульфатов осуществляют лабораторными методами (РД 52.24.407-2006 «Массовая концентрация хлоридов в водах. Методика выполнения измерений аргентометрическим методом» и РД 52.24.361-95 «Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в водах потенциометрическим методом с ионселективным электродом»).



**Рис.4.** Применение портативного pH-метра для определения

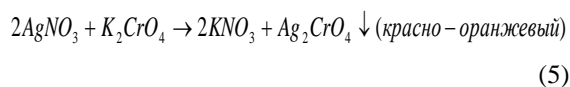
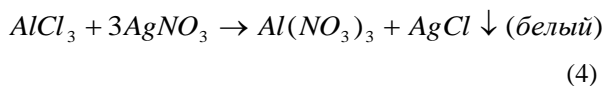
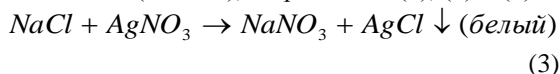
щелочности/кислотности воды вблизи бетонной конструкции

**Fig.4.** Application of a portable pH meter to determine the alkalinity/acidicity of water near a concrete structure.

Основным методом определения содержания хлоридов и сульфатов в бетонных и железобетонных конструкциях является титриметрический анализ (согласно РД 52.24.407-2006 «Массовая концентрация хлоридов в водах. Методика выполнения измерений

аргентометрическим методом» и ГОСТ 31940-2012 «Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов. М.: Стандартинформ, 2013»).

По методу титрования раствором азотнокислого серебра с последующим осаждением (аргентометрическое определение хлоридов по методу Мора) наблюдается осаждение хлоридов раствором нитрата серебра ( $AgNO_3$ ) в присутствии хромата калия ( $K_2CrO_4$ ), по реакциям (3), (4) и (5):



Для полного перехода содержащихся хлоридов в бетоне, бетонный образец (кern) выдерживают не менее 30 суток в закрытой емкости с

дистиллированной водой, приготовленной по ГОСТ 6709-72. Вода должна полностью покрывать образцы. После связывания всех хлоридов в растворе, происходит реакция с хроматом калия с последующим образованием хромата серебра (I) красно-оранжевого цвета (цветной свидетель) (рис.5), что сигнализирует о полном связывании хлоридов ионами серебра [5]. После этого подсчитывают концентрацию хлорид-ионов по формуле 6:

$$X = V_{титр} \cdot H \cdot K \cdot \mathcal{E}_{Cl} \cdot 1000 / V_{пробы}, \quad (6)$$

где:  $H$  – концентрация титранта ( $AgNO_3$ ), моль-экв/дм<sup>3</sup>;  $K$  – поправочный коэффициент к концентрации титранта;  $V_{титр}$  – объём раствора  $AgNO_3$ , который пошёл на титрование, см<sup>3</sup>;  $\mathcal{E}_{Cl}$  – эквивалент хлорид-иона, г/моль-экв;  $V_{пробы}$  – объём воды, взятый для анализа, см<sup>3</sup>; 1000 – служит для перехода от грамма к миллиграммам.



Рис.5. Осаждение хлорид и хромат-ионов в растворе.

Fig.5. Deposition of chloride and chromate ions in solution.

Также определение содержания хлоридов в лабораторных условиях проводят с помощью потенциометрического метода, который основан на определении ЭДС электродной системы, состоящей из хлоридного ионселективного электрода и вспомогательного хлорсеребряного электрода. Однако данный метод затруднён при содержании в воде других растворимых солей, таких как роданиды, сульфиды, бромиды согласно РД 52.24.361-95 «Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в водах потенциометрическим методом с ионселективным электродом».

На настоящий момент для определения сульфатов в поверхностных водах, в том числе и в атмосферных осадках, существует много различных методов [6 – 8, 10]:

- гравиметрические (весовое определение сульфатов в виде осадка  $BaSO_4$ ),
- титриметрические (основаны на титровании сульфатов солями бария или свинца в присутствии чувствительных металлоиндикаторов),

- комплексонометрические (осаждение сульфатов хлоридом бария и обратное титрование избытка ионов бария стандартным раствором ЭДТА после удаления осадка),

- фотометрические (основаны на образовании окрашенных продуктов с ионами бария после связывания сульфатов в виде  $BaSO_4$ ),

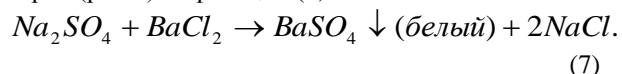
- турбидиметрические (измерение интенсивности помутнения растворов, содержащих сульфатные ионы, в присутствии солей бария),

- ионная хроматография (разделение ионов на ионообменной колонке).

Наиболее используемыми в практике определения сульфатов в бетоне являются: титриметрические, гравиметрические и комплексонометрические методы. Это связано с тем, что для фотометрических (и спектрофотометрических) методов, а также для методов ионной хроматографии требуется дорогое и профессиональное оборудование.

Для определения сульфатов пользовались титриметрическим методом. Основным уравнением

реакции является осаждение сульфат-ионов ионами бария (рис.6) по реакции (7):



Для полного перехода содержащихся растворимых сульфатов в бетоне, бетонный образец (кern) выдерживали 30 суток в закрытой емкости с дистиллированной водой, приготовленной по ГОСТ



Рис.6. Осаждение сульфат-ионов в растворе ионами бария.

Fig.6. Deposition of sulfate ions in solution by barium ions.

После определения глубины карбонизации, а также концентрации хлорид и сульфат-ионов, фактические данные сравнивают со значением предельно допустимых концентраций в нормативных документах, на основании чего делается вывод о степени коррозии бетона обследуемых строительных конструкций, типа и агрессивности среды и других показателей (ГОСТ 31384-2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования») [11]. При обследовании фактическая глубина карбонизации составляла величину защитного слоя бетона, а именно порядка 45-55 мм (в среднем 48-50 мм).

## ВЫВОДЫ

Подводя выводы хочется отметить, что указанные методы с успешностью применяются при обследовании бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений на предмет коррозии и других показателей, однако, на данный момент в РФ не существует отдельных нормативных документов, полностью посвящённых проблеме определения и методики выявления отдельно взятого вида коррозии (например, отдельно по карбонизации) как лабораторными, так и полевыми методами. С развитием данных методов появляется нужда в разработке подобных нормативных документов.

Развитие и расширение научных знаний по проблеме оценки коррозионных разрушений строительных конструкций на реальных объектах

6709-72. Подсчёт концентрации сульфат-ионов в растворе проводился аналогично расчету концентрации хлоридов.

Для цементных бетонов существует ряд методов определения сульфатостойкости, описанных в нормативных документах (ГОСТ Р 56687-2015 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Метод определения сульфатостойкости бетона»).

имеет важное значение для создания теоретической базы, совершенствования старых и создания новых информационно-измерительных систем на ее основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 8 - 11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-723-3-8-11>
2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С. Исследование процессов коррозионной деструкции железобетонных изделий в агрессивных средах с хлорид-ионами // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 61 - 67.
3. Пастухов Ю. В., Сидельникова О. П. Контроль коррозии при эксплуатации зданий и сооружений в особых условиях // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2007. Вып. 7 (26). С.42-43.
4. Хижняков В.И., Иванов Ю.А., Назаров Б.Ф. Переносной полевой прибор для определения остаточной скорости коррозии и степени наводороживания стенки нефтегазопроводов при различных режимах катодной защиты // Экологические проблемы и техногенная безопасность строительства, эксплуатации и реконструкции нефтегазопроводов. Новые технологии и материалы. Томск. 2005. С. 36 - 38.

5. Васильев А.А. Карбонизация и оценка повреждённости железобетонных конструкций. Гомель: БелГУТ. 2012. 263 с.

6. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. Москва: Стройиздат. 1976. 205 с.

7. Васильев А.А. О необходимости разработки нормативного национального нормативного документа по оценке карбонизации бетона // МНМС «Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов ЕС в области строительства». Минск. 2013. С.40 - 54.

8. Горшков В.К. Защита строительных конструкций от коррозии / В.К. Горшков [и др.] Иваново: ИГХТУ. 2003. 192 с.

9. Кулакова Н.Е., Лебедева А.В., Лозовик П.А. Спектрофотометрическое определение сульфатов в атмосферных водах // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск. 2010. С.133 - 137.

10. Hussain R. R. and Ishida T. Multivariable empirical analysis of coupled oxygen and moisture for potential and rate of quantitative corrosion in concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. Vol. 24, no. 7. Pp. 950-958.

11. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6 (372). С. 268-276.

## REFERENCES

1. S V Fedosov, V Eu Roumyantseva, V A Khrunov, M E Shesterkin. About some problems of safety technology and durability of buildings, structures and engineering infrastructure // Building materials. 2015. № 3. Pages 8 - 11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-723-3-8-11>

2. S V Fedosov, V Eu Roumyantseva, V S Konovalova. The research of corrosion processes of destruction reinforced concrete products in corrosive environments with chloride ions // Vestnik grazhdanskikh ingenerov. 2016. № 5 (58), pages 61 - 67.

3. U V Pastukhov, O P Sidelnikova. Corrosion control during operation of buildings and structures in special conditions // Vestnik VSUACE. Ser.: Building and architecture. 2007. №. 7 (26), pages 42-43.

4. V I Khizhnyakov, U A Ivanov, B F Nazarov. Portable field device for determining the residual corrosion rate and the degree of hydrogenization of the wall of oil and gas pipelines at different modes of cathodic protection // Ecological problems and technogenic safety of construction, operation and reconstruction of oil and gas pipelines. New technologies and materials. Tomsk. 2005. P. 36 - 38.

5. A A Vasilyev. Carbonization and damage assessment of reinforced concrete structures. Gomel: BSUT, 2012. 263 pages.

6. S N Alekseev, N K Rosenthal. Corrosion resistance of reinforced concrete structures in aggressive industrial environment. Moscow: Stroizdat. 1976. 205 pages.

7. A A Vasilyev. About the need regulatory the national regulatory document on the evaluation of carbonation of concrete // ISMS « The implementation of design standards and EU standards in the field of construction». Minsk. 2013. P.40 - 54.

8. V K Gorshkov. Protection of building structures against corrosion / V K Gorshkov [et al.] Иваново: ISUCT. 2003. 192 pages.

9. N E Kulakova, A V Lebedeva, P A Lozovik. Spectrophotometric determination of sulphates in atmospheric waters // Water environment: training for sustainable development. Petrozavodsk. 2010. P.133 - 137.

10. Hussain R. R. and Ishida T. Multivariable empirical analysis of coupled oxygen and moisture for potential and rate of quantitative corrosion in concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. Vol. 24, no. 7. Pp. 950-958.

11. Fedosov S.V., Romyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Determination of the resource for the safe operation of concrete structures containing hydrophobizing additives // News of Higher Education Institutions. Technology of the textile industry. 2017. No. 6 (372). S. 268-276.

THE USE OF FIELD AND LABORATORY METHODS FOR THE DETERMINATION OF  
CARBONIZATION, CHLORIDE AND SULPHATE CORROSION AT INSPECTION  
CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Roumyantseva V Eu, Goglev I N, Loginova S A

**Summary** in the article we're considering the main types of corrosion of concrete and reinforced concrete structures, which are identified at inspection of the technical condition of buildings and structures. We describe the main field and laboratory methods for determining the most common types of corrosion of cement concrete: carbonization, chloride and sulfate corrosion. Also we justified the use of these diagnostic methods at inspection of building structures of real objects and we outlined further prospects for improving corrosion monitoring. The presented work is the result of long-term surveys of buildings and structures in Moscow, Ivanovo and other regions of the Central Federal district, Sakhalin region, Yakutia, Komi Republic, etc.

**Subject of research:** the subject of the research are the main types of corrosion of concrete and reinforced concrete structures: carbonization, chloride and sulfate corrosion.

**Materials and methods:** we have analyzed the methods and means of corrosion monitoring, namely the phenolphthalein test and titrimetric methods.

**Results:** we're justified the use of various methods of corrosion damage diagnostics in the inspection of building structures of buildings and structures, as well as further prospects and opportunities for their improvement and additions.

**Conclusions:** the urgency of solving the problem of improving the methods of corrosion monitoring on real objects is reasoned.

**Key words:** carbonization, chloride corrosion, sulfate corrosion, silver nitrate, barium chloride.

## ПРОБЛЕМЫ ОДНОСТОРОННЕГО УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ НЕБОЛЬШОЙ ЭТАЖНОСТИ

И.М. Дьяков, А.И. Дьяков, Ю.И. Дьякова

ФГОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского».

Академия строительства и архитектуры

Адрес: г. Симферополь, ул. Киевская 181

Karta3@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены и проанализированы характерные деформации и повреждения зданий небольшой этажности в сложных инженерно-геологических условиях Крыма послевоенной постройки 20 века, выявленные в ходе обследования технического состояния зданий в Красногвардейском районе Крыма и г. Судак. Определены основные причины деформации и повреждения, связанные с условиями эксплуатации и процессами, происходящими в грунтовом основании и конструкциях здания. Установлено, что развитию характерных кренов наружных стен здания способствуют нарушение отсыпки здания, более высокая степень влажности грунта под краевыми зонами фундамента, а также развитие процесса суффозии грунта и деградация кладки фундамента с наружной стороны стен. Рассмотрены проблемы выполнения работ по усилению, связанные с отсутствием доступа к фундаментам изнутри здания, низкой прочностью материалов фундамента и кладки стен. Определены задачи усиления фундаментов и здания в целом. Авторами предложена методика одностороннего усиления фундаментов в комплексе с системой усиления стен. При ее реализации нагрузки на конструкцию усиления фундамента передаются с конструкции усиления стен. На основании проведенных расчетов зданий с усилением в программных комплексах подтверждена эффективность методики усиления. Рассмотрены подходы к расчету конструкции усиления инженерными методами.

**Предмет исследования:** проблемы и методы одностороннего усиления фундаментов зданий небольшой этажности в сложных инженерно-геологических условиях Крыма

**Материалы и методы:** в исследованиях использованы результаты обследования технического состояния более 15 зданий небольшой этажности послевоенной постройки 20 века в Крыму, выполнен анализ результатов исследований, разработана методика усиления и оценки несущей способности усиления.

**Результаты:** Выявлены характерные причины деформаций и повреждений зданий небольшой этажности, построенных из местных материалов в инженерно-геологических условиях Крыма. Предложены оптимальные методы реконструкции фундаментов зданий небольшой этажности, построенных из местных материалов в инженерно-геологических условиях Крыма и технические решения одностороннего усиления фундаментов.

**Выводы:** разработанный подход к одностороннему усилению фундаментов позволяет решать задачи усиления фундаментов зданий небольшой этажности, построенных из местных материалов в инженерно-геологических условиях Крыма без выведения здания из эксплуатации.

**Ключевые слова:** инженерно-геологические условия, фундаменты, реконструкция, усиление, основание, деформации, крен.

## ВВЕДЕНИЕ

Жилой фонд Крыма в значительной степени представлен зданиями небольшой этажности, возведенных во второй половине 20 века из местных материалов на ленточных фундаментах мелкого заложения. В отдельных районах полуострова характерным являются существенные повреждения таких зданий, связанные с неравномерной осадкой фундаментов. Для приведения зданий в работоспособное техническое состояние необходим поиск оптимальных путей реконструкции фундаментов, учитывающих как особенности конструктивных схем и характеристики грунтового основания, требования современных норм в области сейсмостойкости и безопасности эксплуатации, так и условия выполнения работ.

**Цель исследований** - на основании изучения причин деформаций и повреждений зданий небольшой этажности в инженерно-геологических условиях Крыма, изучения особенностей состояния конструкций и условий выполнения работ, предложить оптимальные пути реконструкции фундаментов без выведения зданий из эксплуатации.

**Задачи исследования:**

– на основании результата обследования зданий выявить характерные виды деформаций и повреждений зданий небольшой этажности, построенных из местных материалов в инженерно-геологических условиях Крыма, основные причины их возникновения;

– установить основные проблемы выполнения реконструкции фундаментов рассматриваемых

зданий в условиях отсутствия возможности выведения зданий из эксплуатации;

– предложить оптимальные методы реконструкции фундаментов зданий небольшой этажности, построенных из местных материалов в инженерно-геологических условиях Крыма и оптимальную конструкцию усиления.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованиями в области реконструкции и усиления фундаментов занимались многие отечественные и зарубежные ученые, среди которых А.Л. Готман, М.И. Баженов, С.Г. Богов, В.В. Далматов, А.И. Мальганов, В.С. Плевков, А.И. Полищук, П.А. Соколовский, Е.А. Сорочан, А.З. Хасанов, Н.А. Цытович, А.В. Черняков, В.Б. Швец и др. В трудах [1-3] предложены различные подходы к усилению фундаментов и конструктивные решения усиления. Вместе с тем, работы, посвященные разработке усиления фундаментов зданий из местных материалов в сложных инженерно-геологических условиях Крыма отсутствуют. Не решена задача выбора оптимальной конструкции усиления при выполнении работ в условиях эксплуатации зданий рассматриваемого типа.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации поставленной цели были проанализированы результаты обследования технического состояния более 15 жилых зданий небольшой этажности, возведенных из местных материалов в послевоенный период в Красногвардейском районе Крыма и городе Судак, поселке Старый Крым. Изучались инженерно-геологические условия территории, характер повреждений и деформаций зданий, условия эксплуатации. В ходе анализа выявлялись типичные процессы, происходящие в грунте основания и

конструкциях зданий. Сооружения с конструкцией усиления моделировались в программных комплексах Лира и PLAXIS.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В послевоенный период 20 века в Северном и Восточном Крыму было построено значительное количество многоквартирных жилых домов, а также общественных зданий этажностью 2-3 этажа стеновой конструктивной системы. Длина зданий, как правило, не превышала 40 м. Материал стен – известняк-ракушечник либо нуммулитовый известняк, уложенный на цементно-песчаном растворе. Толщина стен 500 мм и более. Фундаменты зданий – бутовые и бутобетонные. Перекрытия и покрытие – деревянное по деревянным несущим конструкциям. Антисейсмические мероприятия отсутствуют.

В результате проведения обследования технического состояния более 15 зданий рассмотренной конструкции были выявлены характерные для них деформации и повреждения. Среди наиболее распространенных – следующие:

- крен наружных стен здания в наружном направлении;
- наличие в наружных стенах вертикальных и наклонных трещин с большой шириной раскрытия, связанных с неравномерной осадкой и креном фундаментов (рисунок 1).

В результате изучения инженерно-геологических условий выявлено, что основанием фундаментов большинства зданий является суглинок в твердом состоянии преимущественно непросадочный с включениями дресвы, щебня или гальки. Во всех случаях в грунте присутствуют карбонатные либо гипсовые включения (рисунок 2). На многих объектах отмечался более высокий уровень влажности грунта основания со стороны наружных граней стен по отношению с грунтом с внутренней стороны здания.



Рис. 1. Характерные трещины в стенах зданий  
Fig. 1. Characteristic cracks in the walls of buildings



**Рис. 2.** Карбонатные включения в грунте основания  
**Fig. 2.** Carbonate inclusions in basement soil

Для оценки уровня нагрузки от здания на основания были проведены расчеты нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента. Установлено, что фактические нагрузки на основание фундаментов на 20...30% ниже несущей способности основания. Величина расчетной осадки и крена фундаментов не превышают нормативные значения. Расчетная оценка прочности каменной кладки стен и фундамента так же показала наличие запасов прочности при существующей нагрузке. Таким образом, исходя из расчетной оценки грунтового основания и каменной кладки, можно сделать вывод, что причины неравномерной осадки не связаны с недостаточной шириной фундамента или низкой прочностью каменной кладки фундамента.

В результате проведенных исследований было установлено, что основные причины неравномерных осадок фундаментов обследованных зданий связаны с пространственной неоднородностью карбонатных глинистых грунтов, размоканием и потерей прочности карбонатных включений при увлажнении, развитии процесса суффозии. Увлажнение грунта в большей степени происходит под наружной частью фундамента, что приводит к повышению деформативности и снижению коэффициента постели грунта с данной стороны. В результате наружные стены зданий испытывают крен в наружном направлении, несмотря на наличие изгибающего момента в противоположном направлении. Развитию неравномерных осадок и крену стен способствовали: наличие повреждений в отмостке зданий, недостаточная ее ширина, отсутствие организованной системы водоотведения с кровли зданий, наличие локальных уклонов территории к зданию, а так же процесс деградации кладки фундаментов, преобладающий с наружной стороны.

Основными требованиями к обеспечению безопасности дальнейшей эксплуатации рассматриваемых зданий, реализуемых при их

капитальном ремонте или реконструкции, являются:

- восстановление целостности и работоспособности стен;
- выполнение требований норм по сейсмостойкости здания, в том числе обеспечение работы конструкции перекрытия и покрытия здания как единых дисков (в соответствии с СП 14.13330.2014 "СНиП II-7-81\* "Строительство в сейсмических районах");
- предотвращение дальнейшей деградации фундаментов здания;
- исключение условий дальнейшего развития неравномерных осадок фундаментов.

В рассматриваемых условиях, для предотвращения дальнейших неравномерных осадок фундаментов наружных несущих стен, трещинообразования в стенах и других конструкциях, целесообразно выполнение усиления фундамента с развитием площади подошвы в наружном направлении. Сложность выполнения работ по усилению связана со следующими факторами:

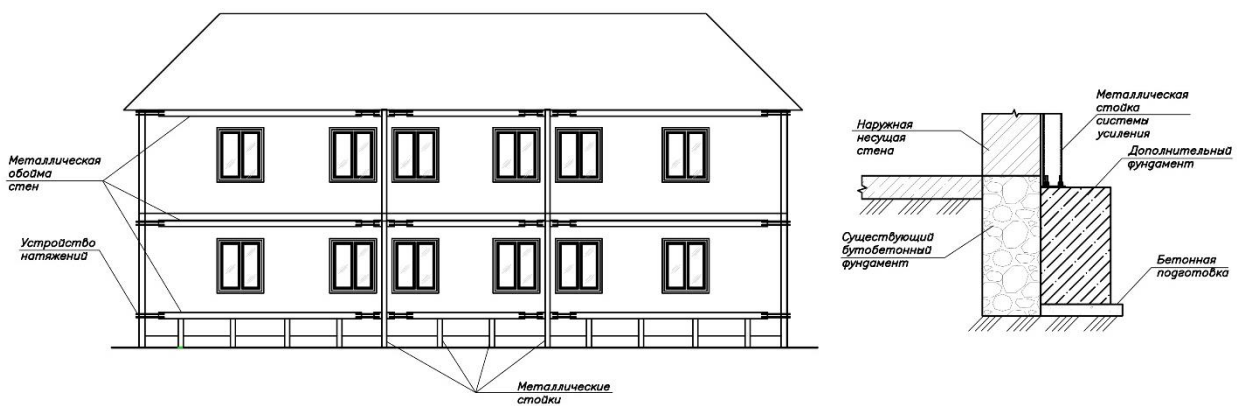
- отсутствие возможности выведения здания из эксплуатации, что исключает выполнение работ по усилению с внутренней стороны здания;
- необходимость обеспечения совместной работы существующего и дополнительного фундамента, передачи части нагрузки на дополнительный фундамент из-за низкой прочности кладки существующего фундамента и одностороннего доступа к его конструкции;

Предлагаемым подходом к решению вопроса реконструкции или усиления фундамента здания является одностороннее увеличение ширины подошвы фундамента с передачей нагрузки на дополнительный фундамент от стен через другие конструкции усиления, минуя существующий фундамент. При этом контакт дополнительного фундамента с существующим фундаментом должен выполнять лишь защитную роль предотвращения деградации кладки.

В качестве конструкции, передающей усилия от стен дополнительному фундаменту можно использовать кольцевые многоуровневые обоймы стен, объединенные вертикальными элементами (стойками). Для передачи вертикальных усилий от стен на конструкцию обоймы, она должна быть выполнена жесткой и располагаться в штрабах стен. На дополнительные металлические стойки (фундаментные анкера) передается только вертикальные усилия. Горизонтальные усилия от крена стен воспринимаются поясами обоймы стен.

На основании предложенного подхода разработана конструкция усиления зданий с реконструкцией фундамента в Красногвардейском районе (рис.3). Усиление состоит из кольцевых обойм стен, вертикальных элементов и дополнительного фундамента. Кольцевые обоймы

стен выполняются в уровнях перекрытия из металлопроката и располагаются в штрабах с обетонированием для надежной передачи усилий. Дополнительно обоймы выполняют функцию повышения сейсмостойкости здания. Вертикальные элементы в виде стоек предназначены для объединения обойм и частичной передачи усилий на дополнительный фундамент. Нижняя обойма имеет дополнительные вертикальные элементы, расположенные с определенным шагом и предназначенные для более равномерной передачи усилий с нижнего уровня стен на дополнительный фундамент. Предложенное усиление позволяет предотвратить развитие крена стен, а так же выполнить требования современных норм, в том числе и в области повышения сейсмостойкости здания.



**Рис.3.** Конструкция усиления здания в Красногвардейском районе Крыма  
**Fig. 3.** The construction of the building gain in the Krasnogvardeysky district of Crimea

Особое внимание обеспечение совместной работы стен здания с конструкцией усиления и дополнительным фундаментом, для чего необходимо решение вопросов преднапряжения дополнительного фундамента, рационального распределения нагрузок от существующего и дополнительного фундамента на основание.

Включение в работу конструкции усиления и дополнительного фундамента требует использования устройств или методов создания предварительной нагрузки на дополнительный фундамент. В случае наличия силового контакта

между существующим и дополнительным фундаментами, пригруз новой конструкции, может привести к дополнительному крену стены либо отрыву стены от существующего фундамента. При отсутствии силового контакта существующего и дополнительного фундамента догружение основания так же может вызвать крен существующего фундамента и стены за счет увеличения нажатия в основании и его деформации.

Проведенные расчеты в программном комплексе PLAXIS и анализ их результатов показали, что

наиболее рациональным вариантом обеспечения совместной работы системы усиления с конструкцией здания является устройство дополнительного фундамента, изолированного с силовой точкой здания от существующего фундамента. При этом создание начальной нагрузки на дополнительный фундамент необходимо выполнять посредством временной установки домкратов между дополнительным фундаментом и обоями стен с последующей фиксацией силового контакта. Такой способ начальной передачи усилий исключает дополнительный крен стены наружу при устройстве усиления.

При назначении величины начального нагружения дополнительного фундамента необходимо учитывать следующие факторы:

- наружные несущие стены испытывают внецентренную нагрузку с моментом, направленным в сторону внутреннего пространства здания а крен стены в наружном направлении связан не с асимметричной эпюрой контактных напряжений, а с неоднородным распределением плотности грунта основания в поперечном направлении фундамента;

- предварительное нагружение дополнительного фундамента создаст в стенах внецентренную нагрузку с моментом в направлении внутреннего пространства здания, увеличивая существующий момент в обресе фундамента;

- нецелесообразно допускать отрыв стены от подошвы фундамента при предварительном нагружении конструкции усиления, так как это может привести к разрушению конструкции существующего фундамента либо ускорению деградации кладки фундамента;

- основная цель предварительного нагружения дополнительного фундамента – включение

усиления в работу конструкции здания для предотвращения дальнейшего развития крена от суффозионных и других процессов в основании.

За критерий определения предельной величины предварительного нагружения дополнительного фундамента целесообразно принять снижение уровня минимальных контактных напряжений под подошвой существующего фундамента на величину не более 30...50%.

Учитывая, что передача нагрузки от стены на дополнительный фундамент передается под углом  $\alpha$  к вертикали (рис.4), его значение можно определить из выражения:

$$0,5\left(\frac{N}{b} - \frac{M}{W}\right) = \frac{N - N_1}{b} - \frac{M + N_1 e_1 + Q_1 h_1}{W} \quad (1)$$

Подставив  $Q = N_1 \operatorname{ctg} \alpha$ ,  $W = \frac{1b^2}{6}$  и проведя преобразования, получим:

$$N_1 = 0,5 \frac{N + \frac{6M}{b}}{1 - \frac{6}{b}(e_1 + h_1 \operatorname{ctg} \alpha)} \quad (2)$$

где  $N$  и  $M$  – вертикальная сила и момент у обреза существующего фундамента до усиления,  $N_1$  и  $Q_1$  – вертикальная и горизонтальная сила предварительного нагружения дополнительного фундамента,  $\alpha$  – угол наклона силового элемента, передающего усилия от обоймы к дополнительному фундаменту относительно вертикали.

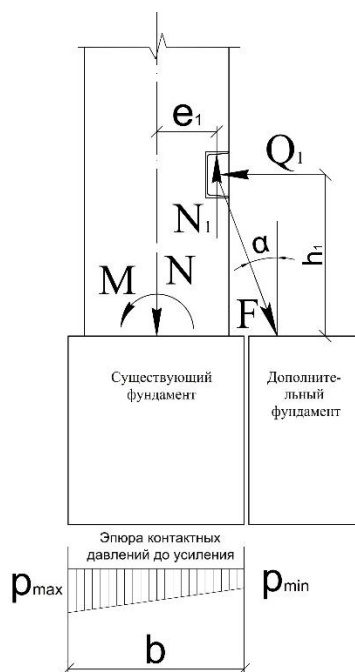


Рис.4. Схема к определению усилий начального нагружения дополнительного фундамента  
 Fig. 4. Scheme for the determination of the efforts of the initial loading additional foundation

Минимальные размеры подошвы дополнительного фундамента должны подбираться исходя из рассчитанных величин  $N_1$  и  $Q_1$  с учетом веса дополнительного фундамента.

## ВЫВОДЫ

Значительная часть жилого фонда Крыма в виде зданий небольшой этажности, возведенных во второй половине 20 века из местных материалов на ленточных фундаментах мелкого заложения имеет повреждения стен и других конструкций. Установлено, что повреждения вызваны неравномерной осадкой фундаментов, связанными с залеганием в основании пространственно неоднородных карбонатных глинистых грунтов, размоканием и потерей прочности карбонатных включений при увлажнении, развитии процесса суффозии. Увлажнение грунта в большей степени происходит под наружной частью фундамента, что приводит к повышению сжимаемости грунта с данной стороны.

Для предотвращения дальнейших неравномерных осадок фундаментов наружных несущих стен В рассматриваемых условиях, целесообразно выполнение усиления фундамента с развитием площади подошвы в наружном направлении. Сложность выполнения работ по усилению связана со такими факторами, как отсутствие возможности выведения здания из эксплуатации, что исключает выполнение работ по усилению с внутренней стороны здания; проблематичность обеспечения совместной работы существующего и дополнительного фундамента, передачи части нагрузки на дополнительный фундамент из-за низкой прочности кладки существующего фундамента и одностороннего доступа к его конструкции.

Предлагаемым подходом к решению вопроса реконструкции или усиления фундамента здания является одностороннее увеличение ширины подошвы фундамента с передачей нагрузки на дополнительный фундамент от стен через другие конструкции усиления, минуя существующий фундамент. При этом контакт дополнительного фундамента с существующим фундаментом будет выполнять лишь защитную роль предотвращения деградации кладки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швец Б.В., Феклин В.И., Гинзбург Л.К. Усиление и реконструкция фундаментов. М.: Стройиздат. 1985. 204 с.
2. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Томск.: РИО Томского МЦНТИ. 1990. 320 с.
3. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. Томск: Нортхемптон. 2004. 476 с.

## REFERENCES

1. Shvets, V. B., Feklin, V. I., Ginzburg, L. K. Strengthening and reconstruction of foundations. M.: Stroizdat. 1985. 204 p.
2. Malganov A. I., Spit V. S., Polishchuk A. I. the Restoration and strengthening of building structures of emergency and reconstructed buildings. Tomsk.: RIO Tomsk CSTI. 1990. 320 PP.
3. Polishchuk A. I. Bases of design and the device of the bases of the reconstructed buildings. Northampton. 2004. 476 p.

## PROBLEMS OF THE UNILATERAL STRENGTHENING OF FOUNDATIONS OF BUILDINGS LOW RISE

Dyakov I.M., Dyakov A.I., Dyakova Y.I.

**Summary** The characteristic deformations and damages of buildings of small number of storeys in difficult engineering-geological conditions of the Crimea of post-war construction of the 20th century revealed during inspection of technical conditions of buildings in Krasnogvardeysky district of the Crimea and Sudak are considered and analyzed. The main causes of deformation and damage associated with the operating conditions and processes occurring in the soil base and structures of the building are determined. It is established that the development of the characteristic rolls of the outer walls of the building contribute to the violation of the blind area of the building, a higher degree of soil moisture under the boundary zones of the Foundation, as well as the development of the process of soil suffusion and degradation of the Foundation laying on the outside of the walls. The problems of performance of works on strengthening connected with lack of access to the bases from within the building, low durability of materials of the base and a laying of walls are considered. The tasks of strengthening the foundations and the building as a whole are defined. The authors propose a method of unilateral strengthening of foundations in conjunction with the system of strengthening the walls. When it is implemented, the loads on the Foundation reinforcement structure are transferred from the wall reinforcement structure. On the basis of the calculations of buildings with strengthening in software systems confirmed the effectiveness of the method of strengthening. The approaches to the calculation of the reinforcement structure by engineering methods are considered.

**Subject:** problems and methods of unilateral strengthening of the foundations of low-rise buildings in complex engineering-geological conditions of the Crimea.

**Materials and methods:** the research used the results of a survey of the technical condition of more than 15 buildings of small number of storeys of post-war buildings of the 20th century in the Crimea, the analysis of research results, developed a method of strengthening and evaluation of the load-bearing capacity of strengthening.

**Results:** the characteristic causes of deformation and damage of low-rise buildings constructed of local materials in the engineering-geological conditions of the Crimea are revealed. The optimal methods of reconstruction of the foundations of low-rise buildings built of local materials in the engineering-geological conditions of the Crimea and technical solutions of unilateral strengthening of the foundations are proposed.

**Conclusions:** the developed approach to the unilateral strengthening of foundations allows to solve the problem of strengthening the foundations of low-rise buildings built of local materials in the engineering-geological conditions of the Crimea without decommissioning the building.

**Key words:** engineering-geological conditions, foundations, reconstruction, strengthening, Foundation, deformation, roll.



УДК 691.316

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КАРБОНАТНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВО-ИЗВЕСТНЯКОВЫХ СИСТЕМ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

Любомирский Н.В., Николаенко В.В., Николаенко Е.Ю.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»,  
295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4,  
niklub.ua@gmail.com; v1told@mail.ru; lesha29.04@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены исследования изменений физико-механических свойств опытных образцов на основе известково-известняковых композиций, твердеющих в среде с повышенной концентрацией углекислого газа, после их хранения в естественных условиях в течение 24 месяцев. Образцы представляют собой цилиндры полусухого прессования (давление прессования – 30 МПа), изготовленные из смеси низкоактивной известковой пыли и заполнителя в виде отходов добычи мраморовидного известняка.

Проведенные исследования показали, что наблюдается рост прочности образцов как вследствие перехода порландита в кальцит при принудительной карбонизации, так и в результате перекристаллизации скаленоэдрического кальцита в ромбоэдрическую форму при хранении образцов в естественных условиях.

Доказана возможность применения отходов содового производства в виде низкоактивной известковой пыли и печных газов в технологии производства прочных строительных материалов.

**Предмет исследования:** закономерности процесса структурообразования дисперсной кристаллической микроструктуры образцов на основе известьесодержащих отходов при организации их твердения в средах с повышенной концентрацией углекислого газа.

**Материалы и методы:** исследование свойств известково-карбонатных композиций проводили на образцах-цилиндрах полусухого прессования (удельное давление прессования – 30 МПа) диаметром 30 мм, твердение которых осуществлялось в карбонизационной камере в условиях 40% концентрации углекислого газа с варьированием времени обработки – 1, 3, 6 и 9 часов. Для изготовления образцов в качестве вяжущего компонента использовали пушенку кальциевую, которая представляет собой низкоактивную известковую пыль, осаждающуюся в электрофильтрах шахтных печей при обжиге известняка. В качестве карбонатного заполнителя применялся мраморовидный известняк Балаклавского месторождения фракционированного состава. Были проведены исследования изменения фазового состава извести пушенки с помощью дериватографического термогравиметрического анализа на синхронном (ТГА/ДСК/ДТА) анализаторе STA 8000, PerkinElmer (США).

**Результаты:** общий анализ испытаний опытных образцов показывает, что с течением времени композиции из известковой печной пыли и известнякового заполнителя набирают прочность как в процессе обработки углекислым газом, так и в естественных условиях за счет перекристаллизации кальцита. Так, прочность образцов, прошедших обработку углекислым газом в течение 1, 3, 6 и 9 часов, увеличилась через 24 месяца хранения в естественных условиях на 55,8%, 28,5%, 70% и 68,8% процентов соответственно. Однако в период времени с 6 до 24 месяцев наблюдается незначительное снижение прочности в связи с наличием пережженных непогашенных частиц известковой пыли в составе сырьевой смеси.

**Выводы:** установлено, что при комбинированном твердении газобетона на основе цементного и цементно-известкового вяжущего, включающем пропаривание и последующую выдержку в среде с высокой концентрацией CO<sub>2</sub>, обеспечиваются условия для протекания как гидратационного, так и карбонатного твердения. Это обеспечивает появление максимального количества кристаллических новообразований и повышение прочностных характеристик материала. Выявленные особенности физико-химических процессов карбонизации цементных и цементно-известковых систем позволяют говорить об эффективности использования техногенного CO<sub>2</sub> в технологии производства неармированных бетонных изделий.

**Ключевые слова:** известковые отходы, мраморовидный известняк, карбонизационное твердение, долговечность

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все более остро стоит вопрос сбережения природных ресурсов и снижения уровня загрязнения атмосферы различными техногенными отходами. Анализ состояния проблемы показывает, что для большинства промышленных производств характерно образование отходов при низкой степени их использования, что сказывается на увеличении площади отвалов и шламонакопителей.

На территории Крымского полуострова расположено несколько крупных промышленных предприятий, которые ежегодно вносят свой вклад в формирование антропогенной нагрузки в регионе путем образования миллионов тонн отходов и выбросов вредных веществ в атмосферу.

Производство кальцинированной соды не является исключением. Химический процесс производства кальцинированной соды по аммиачной технологии основывается на пяти реакциях, одной из которых является получение оксида кальция и диоксида углерода путем обжига карбоната кальция в известково-обжиговых печах [1,2,3]. В результате очистки углекислого газа для дальнейшего его использования получают такой побочный продукт, как известковая пыль, которая отличается низкой активностью и высоким содержанием примесей карбоната кальция. Возможна организация ее частичной реализации как низкоактивной извести. Однако это не позволяет уйти от проблемы скопления данного побочного продукта в отвалах и негативного влияния на окружающую среду.

Решить проблему утилизации минеральных отходов можно за счет их применения в такой материалоемкой отрасли народного хозяйства, как производство строительных материалов и изделий [4,5,6]. Это предопределяет необходимость развития исследований в области получения экономичных и экологических строительных материалов и внедрение разработанных ресурсосберегающих технологий в производство.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В связи с этим актуальным является изучение вопроса применения CO<sub>2</sub> в технологии строительных материалов на основе техногенного известкового вяжущего и известняковых отходов с целью утилизации побочных продуктов производств и уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу.

В результате перехода гидратной извести в карбонат кальция материал упрочняется, увеличивается его водостойкость и морозостойкость. Долговечность известковых материалов доказана временем (дворцы древнего города Кносса XVII – XV вв. до н.э. нао. Крит, Софийский собор в г. Киеве, XI век н.э., древние оборонительные здания и сооружения на побережье Лиссабона и т.п. [7]). Однако, процесс этот длителен и может занимать годы и даже десятилетия.

Интенсифицировать его возможно принудительной карбонизацией материалов на основе извести за счет утилизации специальным образом подготовленных дымовых газов от известковых печей [8,9,10,11].

Авторами статьи были получены оптимальные параметры для получения карбонизированных известково-карбонатных строительных стеновых материалов с необходимыми физико-механическими свойствами [12,13,14,15]. Однако неисследованными остаются вопросы изменения свойств материалов на основе низкоактивного известкового вяжущего принудительного карбонатного твердения с течением времени.

Согласно современным воззрениям структура материала не остается неизменной, а непрерывно претерпевает изменения в пространстве и во времени под действием как внешних, так и внутренних факторов [16]. Исследованию изменений физико-механических свойств строительных материалов с течением времени с целью повышения их эксплуатационной стойкости и долговечности всегда уделялось много внимания [17,18,19]. Ввиду того, что перекристаллизация Ca(OH)<sub>2</sub> осуществляется в относительно короткие технологические сроки [20], то необходимы исследования изменения структуры и свойств карбонизированных известково-карбонатных материалов с течением времени, которые дадут представление о сохранении механических свойств, как одних из определяющих долговечность материалов и изделий.

Целью данной работы является исследование изменения физико-механических свойств и кинетики структурообразования принудительно карбонизированных образцов на основе техногенной низкоактивной извести и отходов камнедобычи крымских мраморовидных известняков после длительного хранения. Срок хранения составил 2 года.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование свойств известково-карбонатных композиций проводили на образцах-цилиндрах полусухого прессования (удельное давление прессования – 30 МПа) диаметром 30 мм, твердение которых осуществлялось в карбонизационной камере [21] в условиях 40% концентрации углекислого газа с варьированием времени обработки – 1, 3, 6 и 9 часов.

Для изготовления образцов в качестве вяжущего компонента использовали пушенку кальциевую, которая представляет собой низкоактивную известковую пыль, осаждающуюся в электрофильтрах шахтных печей при обжиге известняка. В качестве карбонатного заполнителя применялся мраморовидный известняк Балаклавского месторождения фракционированного состава.

Были проведены исследования изменения фазового состава извести пушенки с помощью

дериватографического термогравиметрического анализа на синхронном (ТГА/ДСК/ДТА) анализаторе STA 8000, PerkinElmer (США).

Полученные дериватограммы пушенки кальциевой, представленные на рисунке 1, имеют три ярко выраженных эндотермических эффекта в интервале температур от 100 до 300 °С, от 350 до 550 °С и от 550 до 850 °С и один незначительный экзотермический – в интервале температур от 300 до

350 °С. Эндотермические эффекты относятся к разложению, соответственно,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{CaCO}_3$ , экзотермический эффект свидетельствует о наличии каких-либо органических примесей, возможно, наличие остатков каменного угля. Исследованию подвергали пробы пушенки кальциевой в естественном состоянии и после гашения при разных условиях.

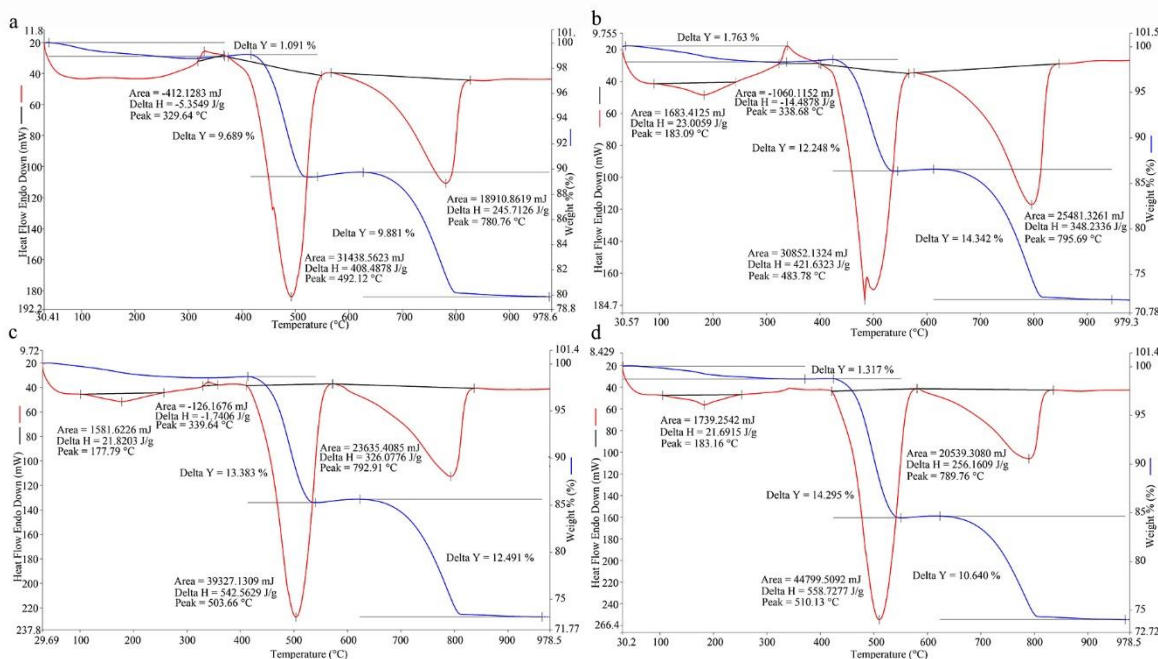


Рисунок 1. Дериватограммы пушенки кальциевой в зависимости от условий обработки:

(a) в естественном состоянии; (b) после гашения и выдерживания в течение 120 мин; (c) после гашения и выдерживания в течение 420 мин; (d) после гашения и выдерживания в течение 420 мин с дополнительным кипячением.

Figure 1. Thermograms of calcium powder lime depending on the processing conditions: (a) in its natural state; (b) after quenching and aging for 120 minutes; (c) after quenching and aging for 420 minutes; (d) after quenching and aging for 420 minutes with additional boiling.

Изменения количественного содержания основных фаз в пушенке кальциевой, определенные расчетным методом по термогравиметрической

кривой, в зависимости от условий ее предварительной подготовки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав пушенки кальциевой при различных условиях предварительной подготовки.  
Table 1. Composition of calcium powder lime under various conditions of preliminary preparation.

Условия подготовки пушенки кальциевой	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (в пересчете на CaO)	$\text{CaCO}_3$
В естественном состоянии	3,4	40,3 (30,5)	22,5
После гашения и выдержки в течение 120 мин	4,4	50,9 (38,5)	29,1
После гашения и выдержки в течение 420 мин	3,7	55,1 (41,7)	28,4
После гашения и выдержки в течение 420 мин с дополнительным кипячением	2,4	58,8 (44,5)	24,3

Анализ экспериментальных данных изменения минералогического состава пушенки кальциевой в зависимости от условий ее подготовки показывает,

что в естественном состоянии пушенка кальциевая содержит около 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В пересчете на CaO это составляет 30,5 %.

Дериватограммы пробы свежегашеной пушенки кальциевой показывают, что содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  увеличивается. Однако, по процентному соотношению в пересчете на  $\text{CaO}$  видно, что в составе остается еще значительное количество (около 3 %) непогасившихся частиц оксида кальция, представляющие собой, так называемый, пережог.

Исходная сырьевая смесь представляла собой композицию из пушенки кальциевой количеством

по массе 35% и заполнителя из мраморовидного известняка в количестве 65%. Влажность сырьевой смеси составляла 6% от массы сухой композиции. Термический анализ исходной сырьевой смеси показывает, что содержание чистого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  составляло 10,3% по массе исходя из экзотермического пика с потерей массы в 2,513% (рисунок 2).

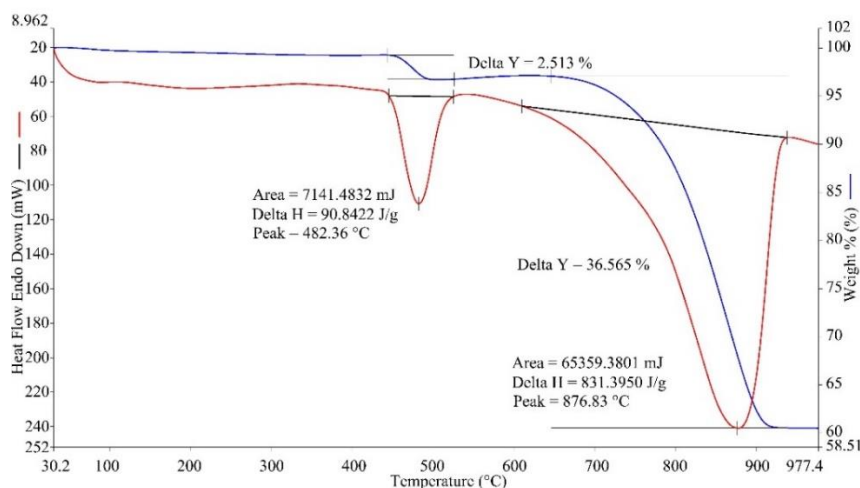


Рисунок 2. Дериватограмма сырьевой смеси для получения опытных образцов.

Figure 2. Thermogram of the raw mix for obtaining test samples.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

С целью определения динамики изменений физико-механических характеристик полученного материала опытные образцы испытывались в разные временные промежутки. Изменения прочности при сжатии, плотности и массы образцов в зависимости от их возраста и времени обработки углекислым газом сведены в таблице 2, из которой

следует, что прочность всех образцов с течением времени увеличивается. Также наблюдается увеличение плотности и прирост массы образцов. Прирост массы свидетельствует о том, что процесс превращения  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в  $\text{CaCO}_3$  продолжается даже после обработки углекислым газом – оставшийся свободный портландит перекристаллизовывается в кальцит, а сами кристаллы скаленоздрического кальцита принимают ромбоэдрическую форму [20].

Таблица 2. Изменение физико-механических характеристик опытных образцов материала с течением времени в зависимости от времени обработки углекислым газом.

Table 2. Changes in the physico-mechanical characteristics of the test samples of the material over time depending on the time of treatment with carbon dioxide.

Время обработки $\text{CO}_2$	$R_{сж}^{сж}$ (МПа)				$\Delta m_{ср}$ (г)				$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )			
	Возраст образцов				Возраст образцов				Возраст образцов			
	1 день	1 месяц	6 месяцев	24 месяца	1 день	1 месяц	6 месяцев	24 месяца	1 день	1 месяц	6 месяцев	24 месяца
1 час	24,53	34,63	43,78	38,22	2,037	2,420	2,473	2,534	1913	1938	1951	1955
3 часа	38,5	43,12	51,43	49,47	1,967	2,439	2,565	2,669	1910	1934	1949	1950
6 часов	25,76	37,65	47,65	43,88	2,032	2,423	2,541	2,584	1913	1929	1941	1945
9 часов	26,42	40,86	48,41	44,59	2,09	2,380	2,572	2,624	1910	1931	1952	1953

Результаты термического анализа исходной сырьевой смеси и материала полученных опытных образцов в зависимости от времени обработки углекислым газом показывают, что количество свободного портландита с увеличением времени обработки уменьшается. Это обусловлено переходом гидроксида кальция в карбонат.

Однако при повышенной продолжительности обработки образцов углекислым газом (6 и 9 часов) наблюдается снижение прочности, что связано с растворением (коррозией) скаленоэдрических кристаллов кальцита при наличии в системе достаточного количества жидкой фазы. Термический анализ материала опытных образцов в зависимости от времени их обработки углекислым газом представлен на рисунке 3.

Полученные данные показывают, что наибольший переход по массе свободного портландита в кальцит происходит в первый час обработки углекислым газом (падению массы в 1,216% процента соответствует наличие 4,9%

свободного портландита). С дальнейшим увеличением времени обработки углекислым газом количество свободного портландита уменьшается до 1,48% и 1,18% при 3 и 6 часах принудительной карбонизации соответственно. При обработке в течение 9 часов наличие свободного портландита минимально и составляет 0,4%.

Снижение прочности образцов в возрасте 24 месяцев относительно прочности в возрасте 6 месяцев может быть обусловлено возникновением деструктивных процессов, которые развиваются в связи с наличием пережженных непогашенных частиц известковой пыли в составе сырьевой смеси. Так как при применении в качестве вяжущего высококачественной извести с высокой активностью прочность карбонизированных образцов при хранении в естественных условиях в течение 6 лет увеличивается на 145% и снижение показателей прочности на сжатие на протяжении всего периода не наблюдается [22].

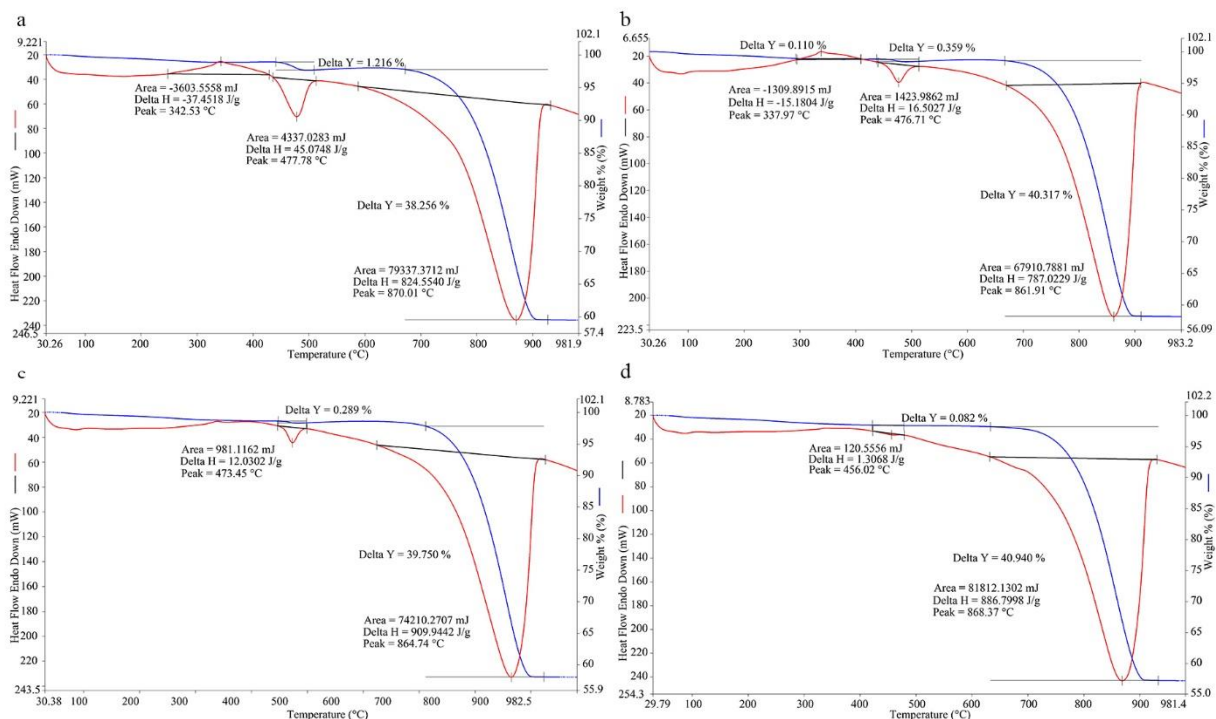


Рисунок 3. Дериватогаммы материала опытных образцов после обработки углекислым газом в течение: (a) 1 час (b) 3 часа (c) 6 часов (d) 9 часов.

Figure 3. Thermogram of the material of the test samples after treatment with carbon dioxide during: (a) 1 hour (b) 3 hours (c) 6 hours, and (d) 9 hours.

Дериватогаммы образцов спустя 2 года естественного твердения (рисунок 4) независимо от времени первоначальной обработки углекислым газом идентичны данным, полученным сразу после

принудительной карбонизации. Наличие карбоната кальция в материале опытных образцов составляет порядка 91% (потери массы – 39,187%).

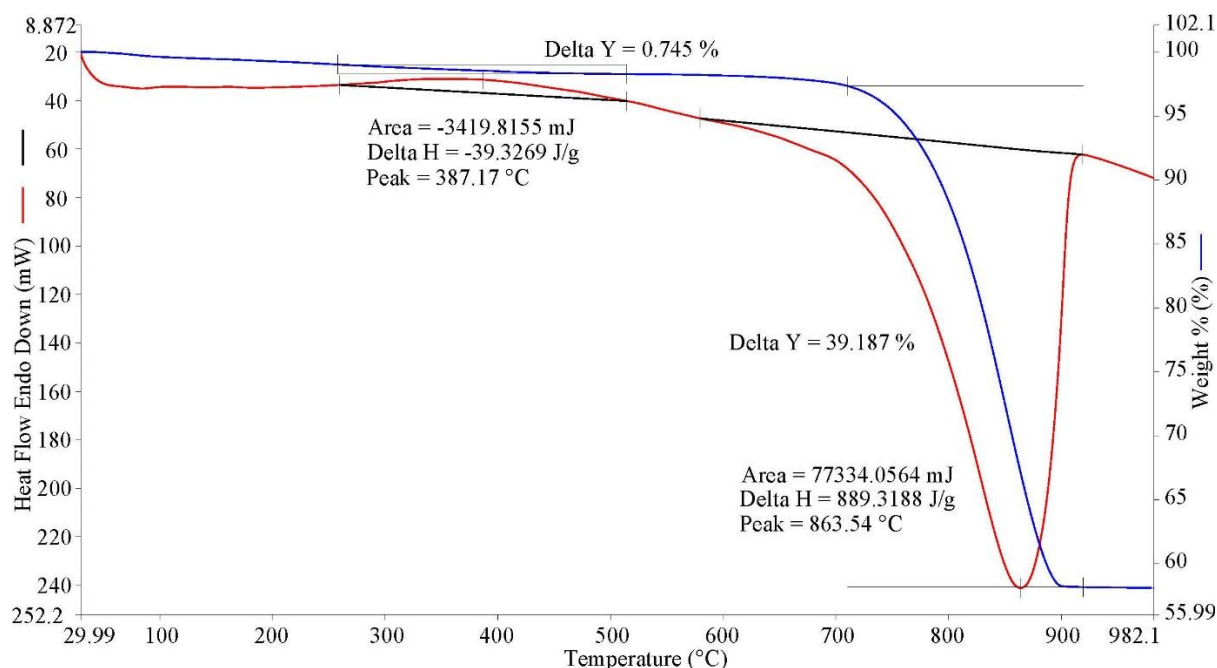


Рисунок 4. Дериватограмма материала опытных образцов после естественного твердения в течение 2 лет.

Figure 4. Thermogram of the material of the samples after natural hardening for 2 years.

Таким образом, сопоставляя данные термического анализа образцов, прошедших обработку углекислым газом, через 1 сутки и через 24 месяца после реакции, можно сделать вывод, что изначальный набор прочности происходит за счет продолжающейся реакции карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , но, в большей степени, увеличение прочностных показателей следует связать с процессами перекристаллизации кристаллов кальцита из скаленоэдрической формы в ромбоэдрическую и, связанными с этим, уплотнением и упорядочением микроструктуры материала. В подтверждение приведены данные об изменениях содержания

гашеной извести и карбоната кальция в образцах разного возраста в зависимости от времени обработки углекислым газом (таблица 3). При анализе процентного содержания карбоната кальция наблюдается незначительное его повышение с течением времени при хранении материала в естественных условиях. Повышения количества  $\text{CaCO}_3$  на 0,3-0,7% в образцах недостаточно для обеспечения такого прироста прочности, что дает возможность говорить о влиянии на данный процесс перекристаллизации кристаллов кальцита.

Таблица 3. Изменение содержания гашеной извести и карбоната кальция в образцах разного возраста в зависимости от времени обработки углекислым газом.

Table 3. Changes in the physicochemical characteristics of the test samples of the material over time depending on the time of treatment with carbon dioxide.

Время обработки углекислым газом	Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)		Содержание $\text{CaCO}_3$ (%)	
	1 сутки	24 месяца	1 сутки	24 месяца
1 час	1,9	—	90,6	90,9
3 часа	1,5	—	90,4	90,8
6 часов	1,2	—	90,2	90,9
9 часов	0,4	—	90,9	91,1

## ВЫВОДЫ

Общий анализ испытаний опытных образцов показывает, что с течением времени композиции из известковой печной пыли и известнякового заполнителя набирают прочность как в процессе обработки углекислым газом, так и в естественных условиях за счет перекристаллизации кальцита. Так,

прочность образцов, прошедших обработку углекислым газом в течение 1, 3, 6 и 9 часов, увеличилась через 24 месяца хранения в естественных условиях на 55,8%, 28,5%, 70% и 68,8% процентов соответственно. Однако в период времени с 6 до 24 месяцев наблюдается незначительное снижение прочности в связи с

наличием пережженных непогашенных частиц известковой пыли в составе сырьевой смеси.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что низкоактивная известковая пыль может выступать в качестве вяжущего компонента в композиции с известняковым заполнителем для получения прочных строительных материалов полусухого прессования, набор прочности которых достигается за счет карбонатного твердения в среде повышенной концентрации углекислого газа. Однако, необходимо уделять особое внимание содержанию в ней пережженных частиц СаО и применять различные технологические приемы для уменьшения сведения их количества к минимуму.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. Х. Бикбулатов, Р. Р. Насыров, Р. Р. Даминов, А. Ю. Воронин, Способ утилизации основных отходов производства кальцинированной соды // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2007. №2. С. 1-16
- 2 М. Х. Курбангалеев, А. А. Хасанова, Л. Ф. Янбеков, Использование твердых бытовых отходов содового производства в качестве сырья для производства товарной продукции // Сборник статей города России: Проблемы строительства, инжиниринга, благоустройства и экологии. 2015. С. 59-62
- 3 М. Джандулаева, М. Адилова З. Алиева, Ф. Холмухаматова, Использование карбонатных отходов содового производства в качестве сырья при производстве силикатного кирпича // Universum: технические науки. 2018. №12. С. 77-80
- 4 М.А. Latifa, S. Naganathanb, H.A. Razakc, K. N. Mustaphab, Performance of lime kiln dust as cementitious material // Procedia Engineering. 2015. №125. Pp. 780 – 787
- 5 А. Arulrajah, А. Mohammadinia, А. D’Amico, S. Horpibulsuk, Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilization of construction and demolition materials // Construction and Building Materials. 2017. № 152. Pp. 999–1007
- 6 P. Jitsanigam, W.K. Biswas, M. Compton, Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance // Sustainable Materials and Technologies. 2018. №17. Pp. 69-71
- 7 C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga, Durability of ancient lime mortars in humid environment // Construction and Building Materials. 2014. № 66. Pp. 606–620
- 8 Pöllmann H, Mineralogical Strategies to reduce CO2 in the fabrication of alternative cements Proc. // IBAUSIL, 2015. №1 pp. 11-129
- 9 D.R. Moorehead, Cementation by the carbonation of hydrated lime // Cement and Concrete research. 1986. № 16 pp. 700–708
- 10 P.De Silva, L. Bucea, D.R. Moorehead, V. Sirivivatnanon, Carbonate binders: Reaction kinetics, strength and microstructure// Cement & Concrete Composites. 2006. № 28 pp. 613–620
- 11 K. Van Balen, D. Van Gemert, Modelling lime mortar carbonation // Materials and Structures. 1994. № 27 pp. 393-398
- 12 Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин, А.С. Бахтин, Т.А. Бахтина, Т.В. Любомирская, Исследование влияния режимов принудительного карбонатного твердения на свойства материалов на основе известково-известняковых композиций полусухого прессования // Строительные материалы. 2017. №8. С. 7-12
- 13 С.И. Федоркин, Н.В. Любомирский, М.А. Лукьянченко, Системы на основе извести карбонизационного твердения // Строительные материалы. 2008. №11. С. 45-47
- 14 Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин, Влияние давления углекислого газа на кинетику принудительной карбонизации известкового камня полусухого прессования и формирование его прочности // Строительная и техногенная безопасность. 2016. № 3 С. 28-38
- 15 Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, Т.А. Бахтина, Е.Ю. Николаенко, В.В. Николаенко, Влияние гидрокарбоната кальция на структурообразование и свойства материалов на основе извести карбонизационного твердения // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11. С. 86-93
- 16 М. Фолмер, Кинетика образования новой фазы // ФИЗМАТЛИТ. Москва. 1986
- 17 A. NevesJuniora, S.R. Ferreirab, R.D. Toledo Filho, E.M. Rego Fairbairnd, J. Dweck, Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres // Composites Part B. 2019. № 163 pp. 351–362
- 18 C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga, Durability of ancient lime mortars in humid environment // Construction and Building Materials. 2014. № 66 pp. 606–620
- 19 M. Abed, R. Nemes, Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials // Construction and Building Materials. 2019. № 212 pp. 350–361
- 20 O. Cizer, K. VanBalen, J. Elsen, D. VanGemert, Crystal morphology of precipitated calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders // 2nd Int. Conf. on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering. 2008 pp. 149-158
- 21 С.И. Федоркин, Н.В. Любомирский, В.Г. Носатов, Т.А. Локтионова, Автоматическая установка и методика изучения процесса карбонизации извести // Строительная и техногенная безопасность. 2007. № 19-20. pp. 74-78.
- 22 Н.В. Любомирский, А.С.Бахтин, Т.А.Бахтина, Изменение физико-механических свойств известковокарбонатнокальциевых материалов принудительного карбонатного твердения во времени // Строительная и Техногенная безопасность. 2017. № 8. С. 67-73

## REFERENCES

- 1 I.Kh. Bikbulatov, R.R. Nasyrov, R.R. Daminov, A.Yu. Voronin, Method of utilization of the main waste of soda ash production, *Electronic scientific journal Oil and gas business*, 2 (2007) 1-16 (in Russian)
- 2 M.H. Kurbangaleev, A.A. Khasanova, L.F. Yanbekov, The use of solid waste soda production as a raw material for commercial products, *Collected papers CITIES OF RUSSIA: PROBLEMS OF CONSTRUCTION, ENGINEERING, LANDSCAPING AND ECOLOGY*, (2015) 59-62 (in Russian)
- 3 M. Dzhandullaeva, M. Adilova, Z. Aliyeva, F. Kholmukhamatova, The use of carbonate waste soda production as a raw material in the production of silicate bricks, *Universum: Technical Sciences*, 12 (2018), 77-80 (in Russian)
- 4 M.A. Latifa, S. Naganathanb, H.A. Razakc, K. N. Mustaphab, Performance of lime kiln dust as cementitious material, *Procedia Engineering* 125 (2015) 780 – 787
- 5 A. Arulrajah, A. Mohammadinia, A. D’Amico, S. Horpibulsuk, Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilization of construction and demolition materials, *Construction and Building Materials* 152 (2017) 999–1007
- 6 P. Jitsanigam, W.K. Biswas, M. Compton, Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance, *Sustainable Materials and Technologies* 17 (2018) e00071
- 7 C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga, Durability of ancient lime mortars in humid environment, *Construction and Building Materials* 66 (2014) 606–620
- 8 Pöllmann H, Mineralogical Strategies to reduce CO<sub>2</sub> in the fabrication of alternative cements *Proc., IBAUSIL*, 1 (2015) 11-129
- 9 D.R. Moorehead, Cementation by the carbonation of hydrated lime, *Cement and Concrete research* 16 (1986) 700–708.
- 10 P.De Silva, L. Bucea, D.R. Moorehead, V. Sirivivatnanon, Carbonate binders: Reaction kinetics, strength and microstructure, *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 613–620
- 11 K. Van Balen, D. Van Gemert, Modelling lime mortar carbonation, *Materials and Structures* 27(1994) 393-398
- 12 N.V. Lyubomirskiy, S.I. Fedorkin, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina, T.V. Lyubomirskaya, Research in influence of regimes of forced carbonate hardening on properties of materials on the basis of lime-limestone compositions of semidry pressing, *Stroitel'nye materialy* 8 (2017) 7–12
- 13 S.I. Fedorkin, N.V. Lyubomirskiy, M.A. Lukyanchenko, System based on lime of carbonizing hardening *Constr. Mater.* 11 45-47 (in Russian)
- 14 N.V. Lyubomirskiy, S.I. Fedorkin, The influence of carbon dioxide pressure on the kinetics of forced carbonation of limestone semi-dry pressing and the formation of its strength, *Construction and technogenic safety* 3 (2016) 28-38 (in Russian)
- 15 N.V. Lyubomirskiy, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina, E. Yu. Nikolaenko, V.V. Nikolaenko, Influence of calcium bicarbonate on the structure and properties of materials based on lime carbonation hardening, *International research journal* 11-4 (2016) 86-93 (in Russian)
- 16 M. Folmer, Kinetics of formation of a new phase, *FIZMATLIT, Moscow* 1986(in Russian)
- 17 A. NevesJuniora, S.R. Ferreirab, R.D. Toledo Filhoc, E.M. Rego Fairbairnd, J. Dweck, Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres, *Composites Part B* 163 (2019) 351–362
- 18 C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga, Durability of ancient lime mortars in humid environment, *Construction and Building Materials* 66 (2014) 606–620
- 19 M. Abed, R. Nemes, Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials, *Construction and Building Materials* 212 (2019) 350–361
- 20 O. Cizer, K. VanBalen, J. Elsen, D. VanGemert, Crystal morphology of precipitated calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders, *2nd Int. Conf. on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering* (2008) 149-158
- 21 S. I. Fedorkin, N. V. Lyubomirskiy, V. G. Nosatov, T.A. Loktionova, Automatic installation and technique of studying of process of carbonization of lime, *Construction and technogenic safety* 19-20 (2007) 74-78.
- 22 N.V. Lyubomirskiy, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina, Change of physical and mechanical properties of lime-carbonate calcium materials of forced carbonate hardening in time, *Construction and technogenic safety* 8 (2017) 67-73

## CHANGES IN THE PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF CARBONATE HARDENING ON THE BASIS OF LIME AND LIME STONE SYSTEMS WITH THE COURSE OF TIME

Lyubomirskiy N., Nikolaenko V., Nikolaenko E.

**Summary** The paper presents the study of changes in the physical and mechanical properties of prototypes based on lime-limestone compositions hardening in a medium with a high concentration of carbon dioxide, after storage in vivo for 24 months. The samples are cylinders of semi-dry pressing (pressing pressure – 30 MPa), made of a mixture of low-active lime dust and filler in the form of waste marble limestone.

Studies have shown that there is an increase in the strength of the samples as a result of the transition of portlandite to calcite during forced carbonation, and as a result of recrystallization of rock-Edric calcite in rhombohedral form during storage of samples in vivo.

The possibility of using soda production waste in the form of low-active lime dust and furnace gases in the production technology of durable building materials is proved.

**Subject:** regularities of the process of structure formation of dispersed crystalline microstructure of samples based on lime-containing waste in the organization of their hardening in environments with high concentrations of carbon dioxide.00

**Materials and methods:** the study of the properties of calcareous-carbonate compositions was carried out on the samples-cylinders of semi-dry pressing (specific pressing pressure – 30 MPa) with a diameter of 30 mm, the hardening of which was carried out in a carbonizing chamber under 40% concentration of carbon dioxide with varying processing time – 1, 3, 6 and 9 hours. For the manufacture of samples as a binder, calcium gun was used, which is a low-active lime dust deposited in the electric filters of mine furnaces during calcination of limestone. As the carbonate filler used marble-like limestone Balaklava deposits graded composition. Studies have been conducted on changes in the phase composition of lime pushenki using derivatographic thermogravimetric analysis on synchronous (TGA/DSC/DTA) analyzer STA 8000, PerkinElmer (USA).

**Results:** the General analysis of tests of prototypes shows that over time compositions from a limy furnace dust and a limestone filler gain durability both in the course of processing by carbon dioxide, and in natural conditions due to recrystallization of calcite. Thus, the strength of samples treated with carbon dioxide for 1, 3, 6 and 9 hours increased after 24 months of storage in vivo by 55.8%, 28.5%, 70% and 68.8%, respectively. However, in the period from 6 to 24 months there is a slight decrease in strength due to the presence of burnt outstanding particles of lime dust in the raw mixture.

**Conclusions:** it is established that the combined hardening of aerated concrete based on cement and cement-lime binder, including steaming and subsequent aging in a medium with a high concentration of CO<sub>2</sub>, provides the conditions for the flow of both hydration and carbonate hardening. This ensures the appearance of the maximum number of crystalline tumors and increase the strength characteristics of the material. The revealed features of physical and chemical processes of carbonation of cement and cement-lime systems allow us to talk about the effectiveness of the use of man-made CO<sub>2</sub> in the production of unreinforced concrete products.

**Key words:** lime waste, marble-like limestone, carbonation hardening, durability, carbon dioxide.



УДК 69.059.25

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РЕКОНСТРУКЦИОННЫХ И ЛИКВИДАЦИОННЫХ РАБОТ АЛМАЗНЫМ ДИСКОВЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Шаленный В.Т., Головченко И., Щегула Р.

Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского, Академия строительства и архитектуры  
295943, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: v\_shalennyj@mail.ru, golovchenko.igor.v@gmail.com,  
romanschegula@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрено состояние вопроса использования алмазных технологий в строительстве, рассмотрены известные способы применения алмазных дисковых пил, а также сформулированы предложения по улучшению технологических возможностей и безопасности производства работ с использованием данного вида оборудования, как отвечающего требованиям «зеленого строительства» при реконструкции и ликвидации строительных объектов. Обоснованно разработаны конструктивно-технологические решения, обеспечивающие безопасность и расширение технологических возможностей путём применения инвентарных лесов и запатентованного крепёжного устройства направляющих алмазной дисковой пилы. Выполнено сравнение технико-экономические показатели возможных вариантов производства работ на объекте ликвидации: первый с использованием алмазного оборудования, второй – использование экскаватора с навесным гидравлическим оборудованием, определена возможная выручка от реализации строительных материалов и конструкций для повторного применения по прямому назначению. Приведена принципиальная организационно-технологическая схема производства ликвидационных работ с применением алмазной дисковой пилы, закрепленной на инвентарных пространственных лесах и самоходного стрелового крана для удаления продуктов разборки. Должное внимание уделено вопросам безопасности при использовании алмазного оборудования на средствах подмащивания.

**Предмет исследования:** технологии алмазной резки железобетонных конструкций и их технико-экономические показатели, безопасность и эффективность проектных решений технологии и организации работ по разборке и ликвидации строительных конструкций.

**Материалы и методы:** общетеоретические методы, такие как: анализ, синтез моделирование и сравнение. Используются также основополагающие научно-прикладные работы в области технологии и организации строительного производства, экономики и управления строительством.

**Результаты:** Осуществлено обоснованное совершенствование прогрессивного способа разрезания железобетонных конструкций, который включает предварительную установку инвентарных пространственных лесов с винтовыми домкратами и горизонтальными поддерживающими балками, сущность которого заключается в том, что фиксацию направляющей алмазной пилы производят при помощи оригинального зажимного узла. Отличие состоит в том, что этот узел жёстко закреплён на разрезаемой железобетонной конструкции, а направляющая пилы зафиксирована также на пространственных лесах с винтовыми домкратами. Произведено технико-экономическое сравнение предложенной технологии с более распространённой технологической схемой разрушения строительных конструкций навесным оборудованием на базе экскаватора. Преимущество последнего состоит лишь в сокращении сроков ликвидации объекта, а по другим технологическим показателям явные преимущества имеет инновационная алмазная технология.

**Выводы:** В результате выполненной работы определено одно из возможных направлений развития алмазной технологии для реконструкции и демонтажных работ на строительных объектах с безусловным обеспечением их безопасности. Применение запатентованного технологического способа даёт положительный экономический эффект, так как позволяет максимально сохранять и повторно использовать полученные в результате разборки железобетонные и бетонные конструкции. Благодаря этому можно частично покрывать затраты на осуществление работ по ликвидации. Разработанную организационно-технологическую схему следует отнести к прогрессивным технологиям «зеленого строительства», снижающей уровень шума и пыли с максимальным повторным использованием продуктов разборки по прямому назначению - в строительной отрасли.

**Ключевые слова:** демонтажные работы, алмазное оборудование, крепёжные приспособления, технико-экономические показатели, безопасность производства работ.

### ВВЕДЕНИЕ

В большинстве случаев, реконструкция либо демонтаж зданий производится в стеснённых условиях, что не позволяет применять оптимальные высокопроизводительные комплексы строительных машин и механизмов. Это обстоятельство требует разработки новых методов производства работ, организационно-технологических решений с привлечением специализированной техники и технологий.

Проблемы обеспечения комплексной безопасности жизнедеятельности сегодня занимают одно из центральных мест в строительной науке и практике [1], в том числе, и на таких достаточно сложных и менее изученных этапах жизненного цикла строительных объектов, как их реконструкция, и ликвидация. Современные алмазные технологии резки железобетонных и каменных конструкций, в отличие от традиционных способов с использованием отбойных молотков и другого оборудования ударного, раздавливающего и иных известных принципов действия [2],

минимизируют уровень шума, пыли и вибрации, а также падение и разброс материалов – продуктов разборки или разрушения. Это соответствует современным требованиям «зелёного строительства» [3, 4], эргономичности, производственной и экологической безопасности [5, 6] строительства и реконструкции гражданских объектов. Технологии с применением современного алмазного оборудования с электро- и гидроприводом позволяют выполнять работы дистанционно, на безопасном для исполнителей расстоянии.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Специалистам известны ранее разработанные конструктивно-технологические решения, обеспечивающие как безопасное производство подобных работ, так и последующую длительную безаварийную эксплуатацию реконструированных строительных объектов [7, 8]. Известные в мире производители алмазного оборудования, такие как «Hilti», «Hydrostress», «Tugolit», «Cedima», предлагают широкий спектр настенных пил, которые представляют собой модульную настенную систему, состоящую из направляющей стойки, головки с гидроприводами и компактной электрогидравлической масляной станции.

Обычно, настенная пила крепится на бетонную стену или перекрытие специальными алюминиевыми или стальными башмаками в предварительно образованных для этого отверстиях. Пила предназначена для алмазного резания железобетонных конструкций толщиной до 1,5 м. На головке пилы закрепляют диски для резки стен. Пила может иметь сменные диски разного диаметра - от 700 до 1600 мм (максимально возможный диаметр 2200 мм).

Нами уже предварительно прорабатывались варианты использования алмазных технологий резки для разборки железобетонных и каменных конструкций аварийных объектов в Ялте. Там предлагалось закрепление направляющей алмазной дисковой пилы не на конструкции, подлежащей резанию, а на специальном поддерживающем инвентарном оборудовании [9]. Такие решения исключают возможность самопроизвольного неконтролируемого обрушения элементов разрезаемой конструкции, тем самым повышая безопасность производства реконструкционных или ликвидационных строительных работ, что нашло отражение в нескольких наших кратких сообщениях и публикациях [10, 11]. К сожалению, ограничения редакции журнала и оргкомитета упомянутой конференции по максимально допустимому объёму материала перечисленных публикаций не позволили полностью раскрыть сущность и преимущества наших предложений, а также сравнительную эффективность и примеры использования прогрессивного алмазного оборудования в разработанной безопасной технологии.

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЫ

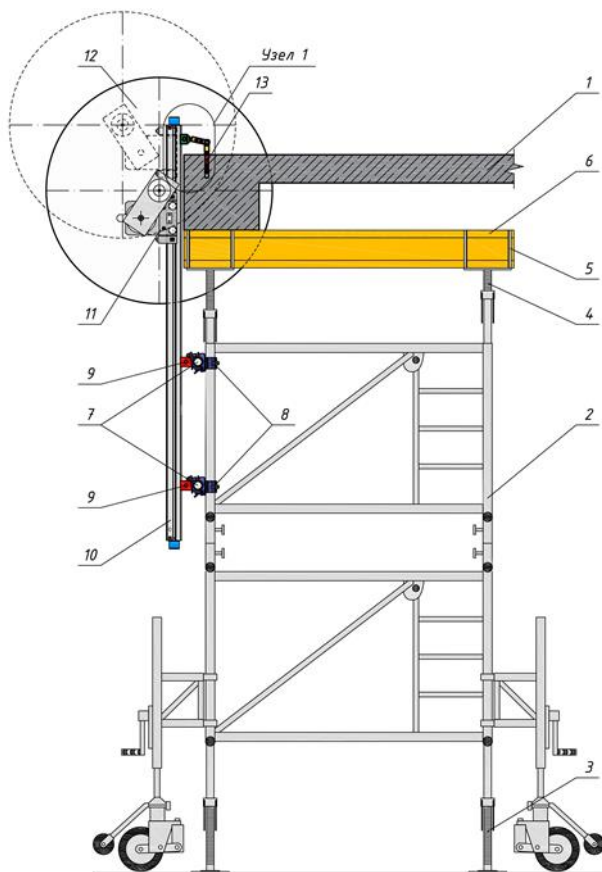
Целью работы является комплексное представление наших предложений по повышению безопасности и экономической эффективности выполнения реконструкционных и ликвидационных работ с применением оборудования алмазной резки дисковыми пилами. Для чего решались нижеследующие задачи:

- анализ состояния вопроса по научно-технической и патентной литературе;
- обоснованная разработка и патентование конструкций крепёжных приспособлений для одновременной надёжной фиксации направляющей алмазной пилы на разрезаемой железобетонной конструкции и поддерживающих её средствах подмащивания;
- детальная проработка технологии применительно к конкретным объектам реконструкции и оценка сравнительной эффективности инновационной технологии для последующего распространения в качестве наиболее целесообразного варианта в определённых областях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В результате многовариантного эскизного проектирования, для расширения технологических возможностей и усовершенствования способа резания конструкций, а также повышения надёжности и точности регулирования алмазного оборудования на инвентарных пространственных лесах было предложено новое крепёжное приспособление (патент РФ № 188527 U1 от 16.04.2019 г.) Такое решение позволяет безопасно выполнять разрезание конструкций типа расположенных на высоте железобетонных балок или других конструкций как массивных, так и криволинейных и существенно уменьшит динамические нагрузки, передаваемые на пространственные леса.

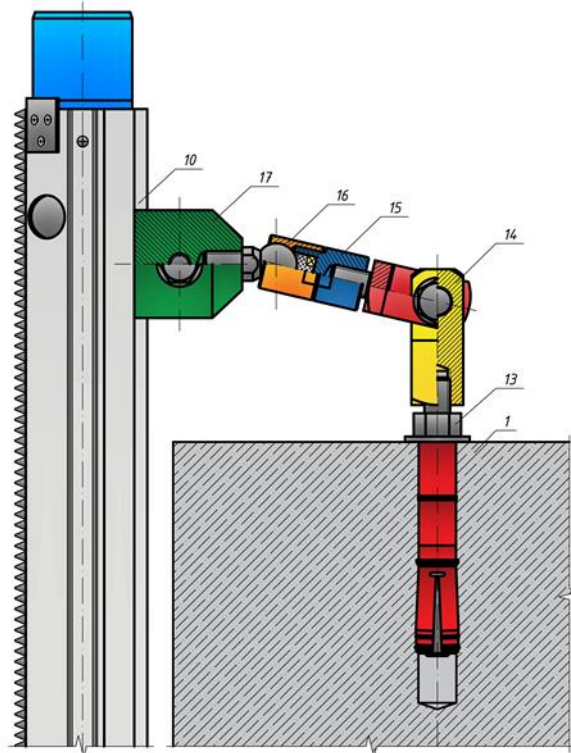
Возможность осуществления полезной модели подтверждается нижеследующим описанием её практической реализации и иллюстрируется чертежами, где на рис. 1 изображён общий вид универсального оборудования для осуществления вертикального реза; на рис. 2 изображён универсальный анкерный зажимной узел, устроенный в теле разрезаемой железобетонной конструкции.



**Рис. 1.** Общий вид устройства для разрезания железобетонных конструкций

**Fig. 1.** General view of the device for cutting reinforced concrete structures

Устройство для разрезания железобетонной конструкции 1 включает инвентарные пространственные леса 2 с винтовыми домкратами в нижней 3 и верхней 4 их частях. Верхние домкраты 4 имеют универсальную вилку 5, в которую установлены горизонтальные поддерживающие балки 6. На лесах 2 смонтированы две горизонтальные промежуточные трубы 7 с помощью хомутов 8. На горизонтальных трубах 7 смонтированы конусные зажимные шарниры 9 и, таким образом, в двух уровнях закреплена направляющая 10 алмазной дисковой пилы 11 с режущим диском 12. Кроме этого, для жесткого закрепления направляющей 10, в конструкции 1 устроен распорный анкер 13, на него навинчен вилочный шарнир 14, далее к нему привинчен шаровой шарнир 15 с резьбовым зажимом 16. В свою очередь, шаровой шарнир 15 закреплён на консольной части, направляющей 10 пилы 11 через болтовой зажим 17.



**Рис. 2.** Предложенный универсальный анкерный зажимной узел

**Fig. 2.** The proposed universal anchor clamping unit

Работа устройства заключается в ниже следующем. Чтобы обеспечить резку конструкции 1 алмазной пилой 11, ее следует предварительно закрепить на лесах 2 и конструкции 1. Для чего леса 2 подкатывают под конструкцию 1, в вилки 5 верхних домкратов 4 устанавливают поддерживающие горизонтальные балки 6 и, при помощи нижних домкратов 3 и верхних 4, поддомкрачивают конструкцию 1 так, чтобы в процессе резки её элементы не сместились относительно исходного положения. Далее в конструкции 1 устраивают распорный анкер 13, на него навинчивают вилочный шарнир 14. На этом шарнире свободно закреплена одна часть шарового шарнира 15, а ответная его часть с резьбовым зажимом 16 устанавливается на направляющую 10 через болтовой зажим 17. Соединяют обе части шарнира 15 и, одновременно, регулируя положение болтового зажима 17 и угол поворота шарнира 15 в вилочном шарнире 14, производят их фиксацию таким образом, чтобы направляющая 10 была жёстко закреплена как на горизонтальных трубах 7 лесов 2, так и на конструкции 1. После чего можно производить её безопасное разрезание потому что даже после полной разрезки конструкции, её части останутся в исходном положении без возможности падения или опрокидывания с высоты.

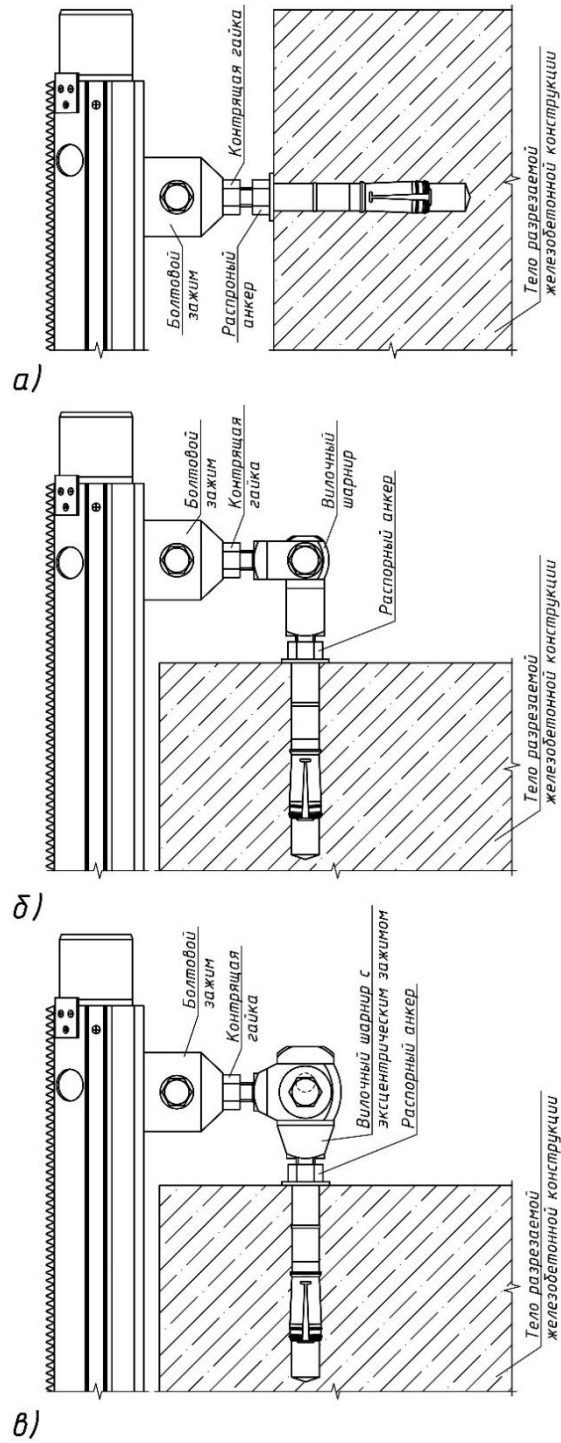
В зависимости от технологических требований и конструктивных особенностей разрезаемых железобетонных конструкций, разработанный анкерный универсальный зажимной узел, может

быть существенно упрощён (Рис. 3). Но в таких случаях придётся изменить последовательность закрепления направляющей алмазной дисковой пилы: сначала – на демонтируемой конструкции, затем поддомкрачивание и лишь потом – крепление направляющей на поддерживающих лесах.

На рис. 3а представлен вариант упрощённого узла крепления направляющей алмазной дисковой пилы, состоящий только из распорного анкера и болтового зажима, закрепляемого на анкере при помощи контрящей гайки. На рис. 3б и 3в представлены упрощённые узлы крепления направляющей алмазной дисковой пилы, состоящий только из распорного анкера и болтового зажима, закрепляемого на анкере при помощи контрящей гайки. Отличием узла на рис. 3б от узла 3в является то, что во втором случае применён вилочный шарнир с эксцентрическим зажимом, который, в свою очередь, позволяет производить регулировку направляющей алмазной пилы по вертикали.

Для сравнения классического и предложенного методов производства работ по ликвидации производственно-складского здания были разработаны две технологические карты: первая с использованием алмазного оборудования на средствах подмащивания с анкерным зажимным устройством, где в роли ведущей машины выступал автомобильный кран (ТК №1, Рис. 4), вторая - с использованием навесного гидравлического оборудования, где в качестве ведущей машины выступал экскаватор (ТК №2, Рис. 5). Для установления технико-экономических показателей была определена номенклатура и объём работ по разборке с последующим формированием ведомости объёмов работ, выбор средств механизации, определена трудоёмкость и заработная плата рабочих, задействованных в соответствующих технологических процессах. При проектировании технологических карт были рассмотрены технологические решения ликвидации объекта и на их основе формулирование сравнительных характеристик социально-экономического и технико-экономического эффекта.

После завершения технологического проектирования означенных комплексных строительных процессов были получены следующие технико-экономические показатели, которые сведены в табл. 1. Исходя из вышеприведённых данных целесообразно выбирать технологическую карту №1, так как при производстве работ по ликвидации производственно-складского здания машинами и механизмами, применяемых в данной технологии, себестоимость единицы продукции и затраты на обслуживание техники меньше, чем при производстве работ машинами и механизмами при производстве работ по технологической карте №2.



**Рис. 3.** Упрощенные узлы крепления: а) состоящий из распорного анкера и болтового зажима; б) состоящий из распорного анкера, вилочного шарнира и болтового зажима; в) состоящий из распорного анкера, эксцентрического вилочного шарнира и болтового зажима

**Fig. 3.** Simplified attachment points: a) consisting of a spacer anchor and bolt clamp; б) consisting of a spacer anchor, fork hinge and bolt clamp; в) consisting of a spacer anchor, eccentric fork hinge and bolt clamp

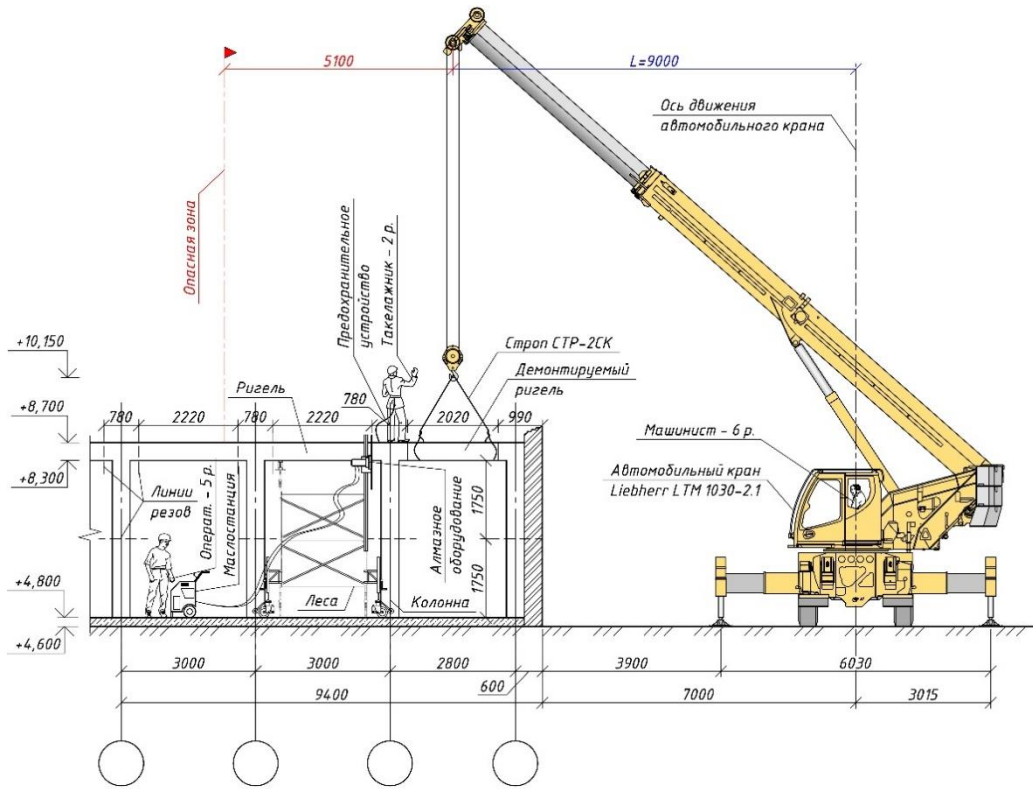


Рис. 4. Технологическая схема резки и извлечения по частям конструкций перекрытия (технологическая карта №1)

Fig. 4. Technological scheme of cutting and extraction in parts of floor structures (technological map No. 1)

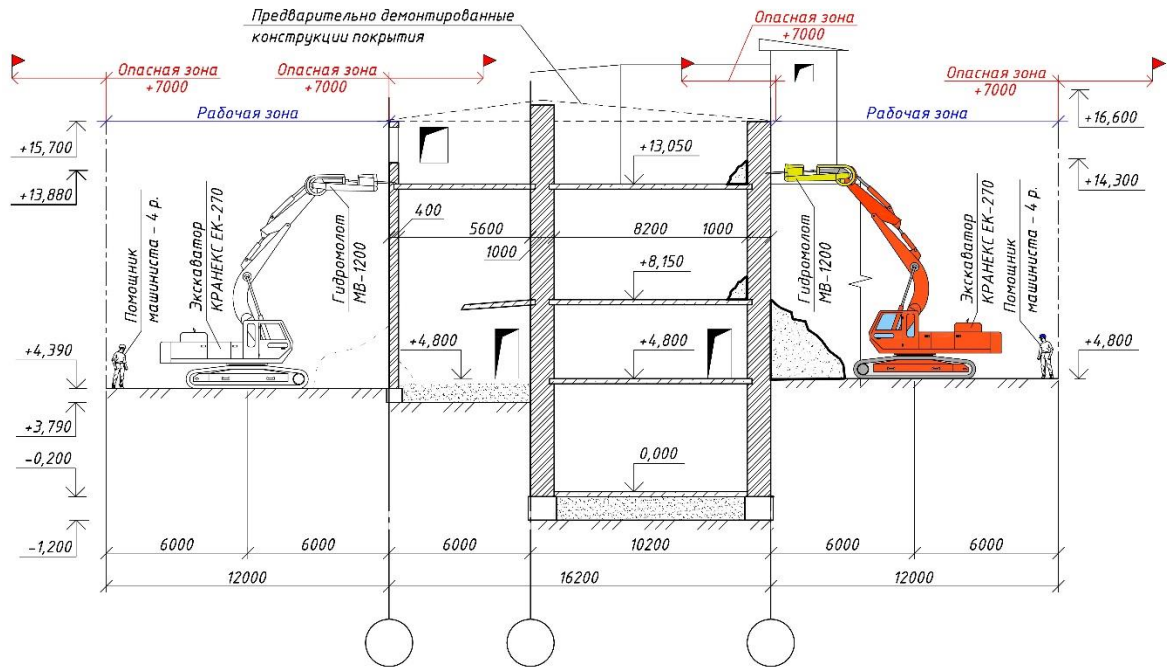


Рис. 5 Технологическая схема разрушения монолитных конструкций экскаватором с навесным гидравлическим молотом (технологическая карта №2)

Fig.5. Technological scheme of destruction of monolithic structures by an excavator with a mounted hydraulic hammer (technological map No. 2)

**Табл. 1.** Техничко-экономические показатели  
**Table. 1.** Technical and economic indicators

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	ТК №1	ТК №2
1	Себестоимость механизированного процесса, $C_o$	тыс. руб.	13 963	23 333
2	Трудоемкость механизированного процесса, $T_o$	чел.-ч.	31 821	22 696
3	Себестоимость единицы продукции, $C_{ед}$	руб./м <sup>3</sup>	803,13	1 342,10
4	Трудоемкость единицы продукции, $T_{ед}$	чел.-ч./м <sup>3</sup>	1,83	1,31
5	Приведенные затраты, $ПЗ_o$	тыс. руб.	14 933	26 462
6	Продолжительность технологического процесса	раб. дни	201	162

Также при производстве работ по технологической карте №1, которая опирается на максимальное сохранение годных вторичных строительных материалов и конструкций, можно получить и положительный экономический эффект от реализации годных продуктов разборки. Для чего был произведён расчёт возможной выручки денежных средств от реализации вторичных строительных материалов, сведённый в табл. 2.

**Табл. 2.** Сводная ведомость вторичных строительных материалов  
**Table. 2.** Secondary building materials list

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за единицу, руб/ед.	Вырученные средства, тыс. руб.
1	Металлолом	т	13,74	12 000 руб./т	165
2	Дерево	м <sup>3</sup>	73,92	6500 руб./м <sup>3</sup>	480
3	Швеллер №10	м	992,99	500 руб./м	496
4	Блоки пильного известняка	блок	103 843	15 руб./блок	1 558
5	Пиленные ЖБ конструкции	т	1625,30	500 руб./т	813
6	Плиты перекрытия	шт.	95	2 000 руб./шт.	190
7	Лестничные марши	шт.	8	1 800 руб./шт.	14
8	Лестничные площадки	шт.	8	1 200 руб./шт.	10
ИТОГО					3 726

В результате расчёта, по каждому виду материалов и конструкций, была определена возможная выручка от реализации, в размере 3 726 тыс. руб., которая в дальнейшем, примерно на четверть, покроет расходы на производство работ по ликвидации объекта.

### Детализация конструктивно-организационно-технологической схемы производства ликвидационных работ

Конструктивно-организационно-технологическая схема, поясняющая и практически реализующая способ резки железобетонных конструкций, упомянутой ранее, представлена на Рис. 6. До начала процессов резки горизонтальных железобетонных ригелей на транспортабельные элементы под них подкатывают пространственные инвентарные леса с винтовыми домкратами в нижней части и вилочными окончаниями в верхней. В указанные вилки устанавливаются инвентарные балки современных опалубочных разборно-переставных систем для устройства перекрытий, а затем, через указанные балки, поддомкрачивают ригель, подлежащий разрезанию. Следовательно, ещё до начала производства операций по отделению одной части конструкции от другой, они уже покоятся в безопасном устойчивом состоянии на средствах подмащивания. И их строповка при этом не обязательна, а может быть осуществлена и после разрезания.

### Безопасность и экологичность реализации инновационной технологии

Представленная конструктивно-технологическая схема принципиально улучшает условия производства работ по алмазной резке железобетонных конструкций в направлении повышения их безопасности по ниже следующим соображениям. Разрезание горизонтально размещённых конструкций перекрытий, расположенных на предварительно смонтированных и поддомкращенных пространственных средствах подмащивания, практически исключают самопроизвольное отделение и падение как разрезаемых элементов, так и соседних. Таким образом обеспечивается техническая устойчивость и геометрическая неизменяемость временно остающейся части демонтируемого сооружения. Кроме того, применение данного способа может дать и положительный экономический эффект, так как он позволяет максимально сохранять и, следовательно, повторно использовать железобетонные и бетонные конструкции. Благодаря этому можно частично покрывать затраты на осуществление работ по ликвидации объектов. По сравнению со сносом жилых домов первых массовых серий при помощи навесного гидравлического оборудования раздавливающего действия на экскаваторах, уменьшаются и расходы на утилизацию продуктов сноса. Намного меньше будет шума, пыли и мусора, негативно влияющих на окружающую городскую среду.

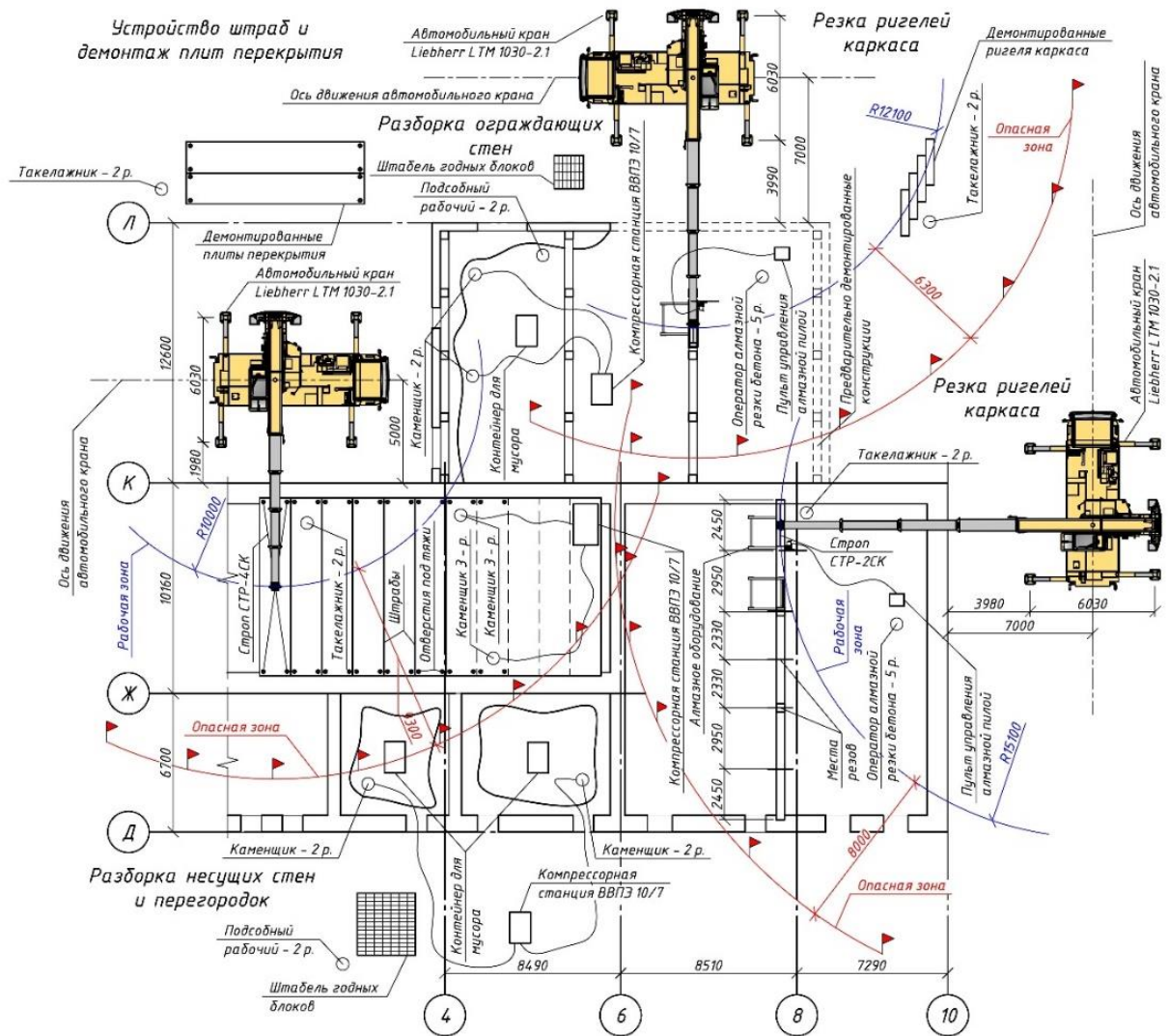


Рис. 6. Фрагмент совмещённых схем производства работ по технологической карте №1

Fig. 6. A fragment of the combined schemes of work on the technological map №1

## ВЫВОДЫ

1. В результате выполненной работы определено одно из возможных направлений развития алмазной технологии для реконструкции и демонтажных работ на строительных объектах с безусловным обеспечением их безопасности.

2. Применение запатентованного технологического способа даёт положительный экономический эффект, так как позволяет максимально сохранять и повторно использовать

полученные в результате разборки железобетонные и бетонные конструкции. Благодаря этому можно частично покрывать затраты на осуществление работ по ликвидации.

3. Разработанную организационно-конструктивно-технологическую схему следует отнести к прогрессивным технологиям «зелёного строительства», снижающей уровень шума и пыли с максимальным повторным использованием продуктов разборки по прямому назначению - в строительной отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теличенко, В.И. Безопасность среды жизнедеятельности //Вестник МГСУ. – 2019. – Т.14. – Вып. 1. – С.11. DOI: 1022227/1997-09.35.2019.1.11.
2. Реконструкция промышленных предприятий. В 2 т. Т2. /В.Д. Топчий, Р.А. Гребенник, В.Г. Клименко и др. – М.: Стройиздат, 1990. – 623с., С.380-434.
3. Теличенко, В.И. От принципов устойчивого развития к «зелёным» технологиям //Вестник МГСУ. – 2016. - №11. –С.5-6.
4. Теличенко, В.И. «Зелёные» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты //Вестник МГСУ. – 2017. – Т.12. – Вып. 4(103). – С.364-372. DOI: 1022227/1997-09.35.2017.4.364-372.
5. Волков, А.А., Тускаева, З.Р. Эргономичность и экологическая безопасность – факторы, необходимые для повышения конкурентоспособности отечественной строительной техники //Вестник МГСУ. – 2017. – Т.12. – Вып. 3(102). – С.308-316.
6. Травуш, В.И., Емельянов, С.Г., Колчунов, В.И. Безопасность среды жизнедеятельности – смысл и задачи строительной науки //Промышленное и гражданское строительство. – 2015. - №7. – С.20-27.
7. Мальганов, А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Атлас схем и чертежей /А.И. Мальганов, В.С. Плевков, А.И. Полищук. – Томск, Центр НТИ. - 1990. – 320с.
8. Колосков, В.Н. Разборка жилых зданий и переработка их конструкций и материалов для повторного использования /В. Н. Колосков, П. П. Олейник, А. Ф. Тихонов. – М.: Изд-тво АСВ, 2004. – 200с.
9. Шаленный, В. Т. Расширение технологических возможностей алмазного оборудования для резки конструкций путем его монтажа на средствах подмачивания / В. Т. Шаленный, Д. С. Покотило //Строительство и техногенная безопасность – 2014. – №49. – С. 84–88.
10. Шаленный, В.Т. Безопасная эксплуатация оборудования для алмазной резки железобетонных и каменных конструкций //Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2017. -№9-10 (224225). – С.41-43.
11. Shalenny, V. Safe technologies for cutting reinforced concrete structures by means of diamond tools. E3S Web of Conferences. Volume 97 (2019): XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019) Tashkent, Uzbekistan, April 18-21, 2019.

## REFERENCES

1. Telichenko, V.I. Safety of the living environment // Vestnik MGSU. – 2019. – V.14. – Extr. 1. – P.11. DOI: 1022227/1997-09.35.2019.1.11.
2. Reconstruction of industrial enterprises. In 2 volumes. V. 2/V.D. Topchii, R.A. Grebennik, V.G. Klimenko and colleagues. – M.: Stroiizdat, 1990. – p.623, P.380-434.
3. Telichenko, V.I. From the principles of sustainable development to ‘green’ technologies //Vestnik MGSU. – 2016. – №11. – P.5-6.
4. Telichenko, V.I. ‘Green’ technologies of the living environment: concepts, terms, standards // Vestnik MGSU. – 2017. – V. 12. – Extr. 4(103). – P.364-372. DOI: 1022227/1997-09.35.2017.4.364-372.
5. Volkov, A.A., Tuskaeva, Z.R. Ergonomics and environmental safety – factors necessary to improve the competitiveness of domestic construction equipment //Vestnik MGSU. – 2017. – V. 12. – Extr. 3(102). – P.308-316.
6. Travush, V.I., Emelianov, S.G., Kolchunov, V.I. Safety of the living environment – meaning and objectives of construction science // Industrial and civil construction. – 2015. – №7. – P.20-27.
7. Malganov, A.I. Restoration and strengthening of building structures of emergency and reconstructed buildings. Atlas of diagrams and drawings /A.I. Malganov, V.S. Plevkov, A.I. Polishchuk. – Tomsk, Center of National Technology Initiatives. – 1990. – p.320.
8. Koloskov, V.N., Oleinik, P.P., Tikhonov, A.F. Dismantling of residential buildings and recycling of their structures and materials for reuse. - Moscow: Publishing House: DIA, 2004. - 200.
9. Shalenny, V. T. Expansion of technological capabilities of diamond equipment for cutting structures by mounting it on scaffolding / V. T. Shalyenny, D. S. Pokotilo //Construction and Techno-Gen Safety - 2014. - №49. - p. 84–88.
10. Shalenny, V.T. Safe operation of equipment for diamond cutting of reinforced concrete and stone structures // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. - 2017. -№9-10 (224225). - P.41-43.
11. Shalenny, V. Safe technologies for cutting reinforced concrete structures by means of diamond tools. E3S Web of Conferences. Volume 97 (2019): XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019) Tashkent, Uzbekistan, April 18-21, 2019.

IMPROVING THE SAFETY AND ECONOMY OF PRODUCTION OF RECONSTRUCTION AND LIQUIDATION WORKS WITH DIAMOND DISK EQUIPMENT

Shalenny V.T., Golovchenko I., Schegula R.

**Summary:** The article considers the state of the issue of using diamond technologies in construction, discusses known methods of using diamond circular saws, and also formulated proposals to improve the technological capabilities and safety of work using this type of equipment as meeting the requirements of "green construction" in the reconstruction and liquidation of construction objects. Reasonably developed design and technological solutions to ensure the safety and expansion of technological capabilities through the use of inventory scaffolding and patented fixing device guides diamond circular saw. Comparison of technical and economic indicators of possible options for work at the liquidation facility was carried out: the first was using diamond equipment, the second was using an excavator with mounted hydraulic equipment, the possible revenue from the sale of building materials and structures for reuse for its intended purpose was determined. A basic organizational and technological scheme of liquidation operations using a diamond disc saw fixed on inventory spatial forests and a self-propelled jib crane to remove disassembly products is given. Due attention is paid to safety issues when using diamond equipment on scaffolding.

**Subject:** of research: technology of diamond cutting of reinforced concrete structures and their technical and economic indicators, safety and efficiency of design solutions, technology and organization of work on the dismantling and elimination of building structures.

**Materials:** and methods: general theoretical methods, such as: analysis, synthesis modeling and comparison. Fundamental research and applied works in the field of technology and organization of construction, economics and construction management were also used.

**Results:** A reasonable improvement of the progressive method of cutting reinforced concrete structures was carried out, which includes the preliminary installation of inventory spatial scaffolding with screw jacks and horizontal supporting beams, the essence of which is that the diamond guide saw is fixed using the original clamping unit. The difference is that the knot is rigidly fixed on the reinforced concrete structure being cut, and the saw guide is also fixed on the scaffolding with screw jacks. A technical and economic comparison of the proposed technology with a more common technological scheme for the destruction of building structures with attachments based on an excavator was made. The advantage of the latter is only in the reduction of the liquidation time of the object, while in terms of other technological indicators, the innovative diamond technology has clear advantages.

**Conclusions:** As a result of the work performed, one of the possible directions for the development of diamond technology for the reconstruction and dismantling works at construction sites with their unconditional security has been determined. The use of the patented technological method gives a positive economic effect, as it allows you to preserve and reuse the reinforced concrete and concrete structures obtained as a result of disassembly. Due to this, it is possible to partially cover the costs of liquidation work. The developed organizational and technological scheme should be attributed to progressive technologies of "green construction", reducing noise and dust with maximum reuse of disassembly products for their intended purpose - in the construction industry.

**Key words:** demolition work, diamond equipment, fasteners, technical and economic indicators, work safety.



## ОБОСНОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА (ПЕНОСТЕКЛА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Грушко И.С., Скибин Г., Дружинина Е.

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, grushkois@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы направленной кристаллизации теплоизоляционного материала – пеностекла.

**Предмет исследования:** Целью работы является проектирование шихтовых составов для синтеза пеностекла с использованием вторичных ресурсов, обеспечивающих наличие в каркасе материала кристаллической составляющей.

**Материалы и методы:** Материалом исследования является золошлаковая смесь, представляющая собой продукт сжигания угля на тепловой электростанции. Золошлаковый отход может рассматриваться как вторичное сырье ввиду разнообразного химического состава и использоваться в качестве составляющей шихты для синтеза пеностекла.

При помощи растрового электронного микроскопа FEI Quanta 600 FEG с применением энергодисперсионного спектрометра рентгеновского излучения фирмы EDAX, установленного в микроскопе, был определен химический состав образца золошлакового отхода. Методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV исследован его фазовый состав, в том числе размеры кристаллитов и количественное соотношение известных фаз в смеси. Порошковые рентгеновские дифрактограммы уточняли методом Ритвельда, расчет массовой доли фаз проводили методом корундовых чисел, расчет размера кристаллитов (ОКР) методом Гальдера – Вагнера (Halder–Wagner methods).

**Результаты и Выводы:** Установлено, что одним из основных факторов, определяющих физические свойства пеностекла, является особенности строения его макро- и микроструктуры, которые регулируются изменением температурно-временного режима и модификацией состава путем введения добавок. Использование вторичных ресурсов (золошлаковой смеси представленного состава) позволяет реализовать формирование заданной микроструктуры двумя способами: целенаправленным введением катализатора кристаллизации и использовании уже существующих кристаллических фаз в исходном материале. Результаты физико-химического исследования золошлаковой смеси и ранее проведенных работ по проектированию состава и технологии получения теплоизоляционного материала пеностекла позволили создать серию шихтовых составов для синтеза пеностекла с различным процентным содержанием катализатора кристаллизации.

**Ключевые слова:** теплоизоляционный материал, пеностекло, кристаллическая фаза, микроструктура, золошлаковая смесь, вторичное сырье.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальным является как создание новых теплоизоляционных материалов с необходимым набором эксплуатационных характеристик, так и совершенствование, оптимизация отдельных свойств существующих материалов, их грамотное применение и использование при проектировании и строительстве новых, а также при реконструкции существующих зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения.

Пеностекло (вспененное стекло, ячеистое стекло) – теплоизоляционный материал, представляющий собой вспененную стекломассу, обладающую низкой теплопроводностью, высокой прочностью, морозостойкостью, низкой плотностью. Так же материал экологически безопасен, не воспламеняется и не горит, не подвержен поражению бактериями и грибами, не

привлекает в качестве пищи грызунов ввиду полностью неорганического состава. Совокупность вышеуказанных свойств обеспечивает возможность его использования во многих отраслях народного хозяйства.

Одним из факторов, препятствующих широкому использованию пеностекла, является его высокая стоимость в пересчете на 1 м<sup>3</sup> по сравнению с теплоизоляционными материалами других видов. Подавляющее большинство исследователей ставят своей целью максимальное снижение себестоимости конечного материала за счет использования в качестве сырьевой базы отходов промышленного производства различной природы [1-7]. Применение подобных отходов, расположенных в регионе предполагаемого производства строительных материалов представляется экономически обоснованным в части затрат на транспортировку сырья.

В Ростовской области расположена электрическая станция НчГРЭС, в результате работы которой ежегодно при сжигания угля образуется более 1 млн. т отходов, и в отвалах электростанции в настоящее время расположено свыше 50 млн. т золошлаковой смеси (ЗШС). Для повторного вовлечения в хозяйственный оборот отходов подобного состава необходимо понимание их исходных характеристик и возможности протекания физико-химических процессов взаимодействия с технологическими добавками, термодинамику возможных реакций и величину воздействия на систему для получения конечного продукта с заданным комплексом свойств.

Несмотря на достаточно большое количество публикаций, посвященных пеностеклольному материалу [7], его применению [8], свойствам [9], особенностям производства [10], недостаточно изучены вопросы его строения.

Физические свойства пеностекла зависят, в том числе, и от его макро- и микроструктуры, которые регулируются изменением температурного режима синтеза и модификацией состава путем введения добавок. Основу микроструктуры межпоровой перегородки пеностекла составляет стеклофаза, которая может быть модифицирована различными добавками, и образовывать стеклокристаллическую форму. Известно, что кристаллическая фаза неоднозначно влияет на синтез пеностекла: при вспенивании затормаживает рост ячеек, при стабилизации увеличивает структурно-механическую прочность образовавшейся пены в пиропластичном состоянии. Однако, отсутствует информация о прямой зависимости между физико-химическими параметрами стекла и наличием в нем кристаллической фазы. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что вопросы кинетики процесса вспенивания пеностеклольных материалов, шихтовые составы которых по-разному предрасположены к кристаллизации, а также создание пеностекла с использованием вторичных ресурсов (на примере ЗШС ТЭС) с заданными свойствами в зависимости от условий его синтеза, мало изучены [11, 12].

Целью настоящей работы является проектирование шихтовых составов для синтеза пеностекла с использованием вторичных ресурсов, обеспечивающих наличие в каркасе материала кристаллической составляющей.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

С целью выявления основных направлений развития науки в области формирования направленной кристаллизации пеностекла выполнен обзор различных баз данных научно-технической литературы (Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Elibrary.ru, rsl.ru и т.д.) за период с 2009 г. по н.в.

В работе [13] показано, что образование в расплаве мелкокристаллической структуры во время вспенивания позволяет получить

пеностеклольный материал с равномерным распределением мелких и замкнутых пор к матрице материала. Есть сведения о том, что кристаллизация стекла, на основе которого будет синтезирован пеностеклольный материал, рассматривается как негативное явление, отрицательным образом влияющее на его свойства и затрудняющее равномерное вспенивание. Как причина высокого водопоглощения пеностеклольного материала указана, в том числе, кристаллизация исходного стекла.

Кристаллизация меняет величины вязкости и поверхностного натяжения, являющихся основными факторами при вспенивании [14]. Крупные неравномерные кристаллы затрудняют вспенивание вследствие повышения поверхностного натяжения и вязкости или препятствуют получению пеностеклольного материала. В связи с этим кристаллизацию исходного стекла исключают посредством снижения температуры вспенивания или введением антикристаллизационных добавок в стекло (например, до 6 % (по массе) пиролюзита, 3 – 5 % оксида магния или алюминия). Очевидно, что введение дополнительных компонентов усложняет процесс, в связи с чем более рациональным и при этом эффективным и интенсивным по воздействию является снижение температуры вспенивания до значений ниже 850 °С [14].

Считается, что наличие кристаллов крупных размеров в стекле способствует разрушению межпоровых перегородок, увеличению значения показателя водопоглощения и, как следствие, снижению долговечности и морозостойкости. Повышенная кристаллизационная способность стекол затрудняет процессы вспенивания и препятствуют ему [15].

Пеностеклольный материал с наличием кристаллических включений в матрице имеет более высокие значения плотности и прочности по сравнению с пеностеклольным материалом с полностью аморфной структурой. Так, его средняя плотность с наличием кристаллических включений составляет 250 кг/м<sup>3</sup>, с полностью аморфной структурой – 220 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – 3,5 и 2,3 МПа соответственно [16]. Получение таких частиц в стекле возможно путем частичной кристаллизации или при микроликвационном расслоении.

Авторами работы [17] разработан двухстадийный способ получения пеностеклольного материала через промежуточный продукт (стеклогранулят), синтезируемый путем низкотемпературной термообработки шихты; пеностеклольный материал представляет собой аморфный пористый материал, содержащий наноразмерные структурные элементы в виде кристаллических включений, который обладает повышенными прочностными характеристиками по сравнению с традиционным пеностеклольным материалом, получаемым на основе стеклобоя. Стеклогранулят выступает исходным сырьем для

последующего вспенивания и получения изделий с заданными характеристиками. По фазовому составу стеклогранулят является стекловидным материалом с присутствующими в нем остаточными кристаллами кварца. Свойства пеностекольного материала зависят от состава и структуры присутствующих фаз стеклогранулята, от размера и взаимного расположения структурных элементов на наноуровне. Пеностекольный материал характеризуется наличием гетерогенной структуры, связанной с присутствием в объеме стекловидной матрицы межпоровой перегородки структурных элементов размером 50 – 100 нм. Пространственная неоднородность стеклофазы вызвана процессом растворения остаточного кварца стеклогранулята в процессе вторичной обработки на стадии вспенивания [16]. Временное сопротивление образцов пеностекольного материала при сжатии имеет значение 3 МПа (образцы с размерами структурных элементов 60 – 80 нм), а материала с аморфнокристаллической структурой – не более 1,5 МПа. Такие значения авторы работы объясняют малым значением структурных элементов и упрочнением матрицы межпоровой перегородки за счет нанокластеров.

При получении стеклогранулята из механоактивированных стекольных шихт по низкотемпературной технологии (850 – 950 °С) сохраняется кристаллическая фаза в виде кварца, которая полностью или частично растворяется в процессе вторичной термообработки смеси на стадии вспенивания, что увеличивает прочностные характеристики материала.

Имеются сведения о положительном влиянии кристаллизационных процессов на механические свойства пеностекольного материала. Установлено, что появление новой кристаллической фазы в межпоровой перегородке увеличивает механическую прочность материала до 2 МПа [18]. Рост прочности сопровождается увеличением плотности материала и ухудшением его теплофизических характеристик. Поэтому важно, чтобы процесс кристаллизации материала был контролируемым и направленным, а не самопроизвольным.

Научной группой под руководством О. В. Казьминой (ТПУ) в работе [19] проведено исследование микроструктуры аморфной перегородки пеноматериала, а также механизма формирования его прочной аморфной матрицы. Упрочнение материала авторы объясняют скоплением основного кремнийсодержащего структурного элемента у границ перегородок матрицы. Рассмотрены причины и механизмы образования глобулярной структуры (глобулы – наноразмерные гранулы сферической формы, разделенные порами микронного размера). Изменение в структуре упрочненного пеноматериала определяется не только структурой и наличием остаточной кристаллической фазы, но и структурой аморфной матрицы. В ходе научного исследования выявлено образование новых

структурных элементов в пеностекольном материале – наноглобул со сложной многоуровневой структурой, наличие которых повышает прочность готового материала.

В работе [20] определены составы для получения пеностекольных материалов, отличающихся по составу от традиционного пеноматериала присутствием кристаллической фазы, а также рекомендации по их технологии получения. Качество пеностекольного материала определяется составом промежуточного продукта (стеклогранулята), на основе которого получается конечный продукт. По фазовому составу стеклогранулят является аморфно-кристаллическим с преобладающим содержанием стеклофазы. При этом существует общая закономерность – с уменьшением количества кристаллической фазы в стеклогрануляте в целом улучшаются условия перехода смеси в пиропластическое состояние на стадии вспенивания и уменьшается плотность пеностекольного материала. Также наблюдается общая закономерность снижения количества кристаллической фазы с ростом температуры, при последующем повышении которой до 900 °С происходит стабилизация, а при более высоких температурах и кристаллизация расплава. В качестве критериев получения пеностекольного материала авторы указывают следующие факторы: исходный материал при получении стеклогранулята должен иметь размер не более 100 мкм, содержание стеклообразующего оксида кремния в исходном материале должно быть не менее 60 % (при содержании в исходном материале  $\text{SiO}_2$  по отношению  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не менее 4). С повышением температуры обработки шихты содержание кристаллической фазы уменьшается, а количество стеклофазы стеклогранулята увеличивается с ростом доли аморфной составляющей в кремнеземистом компоненте шихты [21].

В работе [22] авторы анализировали микро- и мезоструктуры аморфной матрицы межпоровой перегородки пеностекла, модифицированного наноразмерным диоксидом циркония в количестве 0,3 % (максимальная температура вспенивания смеси 850 °С с изотермической выдержкой 20 мин). Условием повышенной прочности пористой системы является наличие кристаллитов, упорядоченно располагающихся в рентгеноаморфной матрице, и правильная с точки зрения симметрии упаковка пор. Также было определено, что механическая прочность аморфной фазы повышается в присутствии микро- и наноразмерных частиц кристаллической фазы, которая не будет концентратором напряжений на границе раздела фаз, приводящих к разрушению.

В публикации [23] представлено исследование кристаллизационных процессов, протекающих при термообработке низкотемпературного стеклогранулята, в целях установления возможности управления данными процессами путем введения катализаторов кристаллизации и получения высокоэффективных пеностекольных

материалов. В качестве инициаторов кристаллизации исследованы оксид кремния, титана и ильменитовый концентрат. Оксид кремния в виде кварца присутствует как остаточная кристаллическая фаза и может инициировать кристаллизацию при вторичной термической обработке гранулята, которая происходит на стадии вспенивания. Совместное присутствие оксидов титана и железа благоприятно влияет на формирование мелкокристаллической структуры силикатных стекол. Для кристаллизации в шихту добавляли катализатор в количестве 5, 8 и 10 % (по массе). Кристаллизация в межпоровой перегородке материала нитевидного девитрита субмикронных размеров увеличивает прочность готового пеноматериала до 4,5 МПа по сравнению с прочностью 2,6 МПа пеностеклового материала, не кристаллизующегося при температуре вспенивания. Способностью к кристаллизации обладают низкощелочные составы ( $\text{Na}_2\text{O}$  16 % по массе) стеклогранулята на основе маршалита и опоки. Катализатором кристаллизационных процессов выступает остаточный кварц, количество которого после термообработки уменьшается с 11 до 6 % (по объему) для состава маршалита и с 16 до 10 % (по объему) для состава из опоки. Основной кристаллизующейся фазой является девитрит, содержание которого растет с увеличением времени выдержки с 30 до 90 мин при температуре вспенивания.

Учеными научной группы БГТУ им. В. Г. Шухова под руководством О. В. Пучка установлено, что при увеличении температуры вспенивания эксплуатационные характеристики пеноматериала ухудшаются, что связано с изменениями реологических свойств пенообразующей смеси в процессе вспенивания. Стеклокомпозит, синтезированный при 800 – 820 °С, обладает прочностью при сжатии до 3,9 МПа. Он содержит кристаллы вытянутой формы  $\alpha\text{-SiO}_2$  и  $\beta$ -воллостанита (полевой шпат), представляющие собой армирующую сетку, которая, по мнению авторов работы, является причиной увеличения прочности материала. При повышении температуры вспенивания на 50 °С содержание (по массе) кристаллической фазы возрастает с 3,1 до 9,4 %, в результате увеличивается плотность распределения кристаллов, однако прочность образца снижается (до 2,3 МПа). Снижение прочности вызвано разрушением межпоровых перегородок и объединением пор в более крупные неравномерные образования с большим количеством дефектов [24].

В работе [25] авторы определяли степень влияния кристаллизации на процесс получения пеностекла и зависимость вспенивания от выделившихся кристаллических фаз. Вспенивание гранул проводили в муфельной печи при 900 °С и времени вспенивания 20 – 40 мин. Проведен рентгенофазовый анализ материалов, прошедших тепловую обработку. Приведены качественные и количественные характеристики представленных кристаллических фаз. Следует отметить, что

результаты подобного анализа для шихты отсутствуют, что не позволяет сделать вывод об их структурных изменениях в результате термообработки. Авторами установлено, что во вспененных составах кристаллической фазы выделилось до 44 % (по массе), в не вспененных 53,78 % (по массе) и более. Интенсивное выделение кристаллических фаз влечет за собой полную остановку процесса образования пористого материала. Это происходит в результате изменения химического состава стеклофазы, что приводит к изменению ее реологических свойств.

В работе [26] при создании композита на основе теоретических знаний о геонике, в качестве каркаса выбран пеностеклольный материал и подвергнут модификации для управления его структурой на нано-, микро- и макроуровнях. Авторами разработаны специальные наномодифицирующие добавки, повышающие прочностные характеристики пеностекла на микроуровне за счет армирования стеклольной матрицы кристаллическими включениями (выделяются кристаллические фазы размером 0,6 – 7,0 мкм), создавая аморфно-кристаллический каркас. Также это позволяет сохранить на макроуровне мелкопористую структуру (100 – 500 мкм), которая не снижает теплофизических и акустических характеристик созданного композиционного материала. Таким образом, введение в состав пеностекла мелкодисперсных добавок на основе кристаллического кварцевого сырья различного происхождения предоставляет возможность создания материала конструкционного назначения с повышенной прочностью за счет армирования каркаса. Допустимой величиной инородных включений, в том числе кристаллов стекла, которые не вызывают нарушений в развитии структуры пеностекла, а также не снижают его структурно-механическую прочность, является размер, не превышающий половины толщины межпоровой стенки в наиболее узком месте, т.е. около 35 – 50 нм. Кристаллы больших размеров, возникающие на стадии спекания пенообразующей смеси, вызывают заторможенное развитие элементов ячеек и, как следствие, неравномерность развития всей структуры пеностекла [27].

В отдельных работах ученых, посвященных пеностеклу, имеется информация о наличии кристаллических фаз в аморфном каркасе материала. В работе [28] в пеностекле обнаружено присутствие кристаллической фазы триклинного волластонита при нагревании до 950 °С с различным временем выдержки, при этом пористость материала составляет 56,6 %, прочность при сжатии 11,7 МПа. В исследованиях [29] представлен пеностеклольный материал, полученный с использованием нитрида алюминия и стеклянных промышленных отходов, показано наличие многочисленных возможных фаз, включая главным образом волластонит и  $\text{SiO}_2$ .

В работе [30] в качестве вспенивающего агента использован графит. Близкие значения температуры

размягчения стекла и температуры окисления порообразователя предоставляют возможность формирования качественного пеноматериала. Основной кристаллической фазой после термообработки является волластонит (при температурах 750, 850, 1000 и 1050 °С). Рост кристаллов в каркасе пеностекла придает материалу дополнительную прочность, вызванную кристаллизацией. Образец пеностекла с оптимальными параметрами в рассматриваемой работе (порообразователь 1 %, температура синтеза 1000 С) имеет плотность 0,86 г/см<sup>3</sup> и прочность при сжатии 12,4 МПа. Авторами [31] показана тенденция изменения степени кристаллизации пеностеклового материала в зависимости от температуры (800, 850 и 900 °С). При 800 °С обнаруживаются незначительные кристаллические образования, свидетельствующие о ранней стадии кристаллизации. С увеличением температуры можно наблюдать рост α-кварца и следы кристобалита. При дальнейшем увеличении температуры до 850 °С интенсивность пиков кристобалита возрастает. При 900 °С наблюдается снижение пиков α-кварца вследствие его перехода в кристобалит и появление волластонита. Морфологические исследования пеностекла показали наличие кристаллов размером 1 – 2 мкм, при 900 °С – однородное распределение удлиненных кристаллов волластонита и кристаллов кристобалита, расположенных на внутренней поверхности пор, что свидетельствует об объемной кристаллизации.

Анализ представленного материала позволяет сделать следующие выводы о направлении исследований в мировой науке.

1. Степень влияния кристаллической фазы на формирование и развитие структуры пеностеклового материала (пеностекла) и его свойства трактуется учеными неоднозначно. Выявлено, что причиной отрицательного влияния кристаллической фазы в каркасе пеностеклового материала являются крупные кристаллы, наличие которых затрудняет вспенивание за счет повышения поверхностного натяжения и вязкости. К положительным эффектам следует отнести возможность регулирования количества кристаллической фазы, ее состава и размера частиц, что позволяет управлять свойствами материала и синтезировать продукт с заданными характеристиками, такими как механическая прочность (отдельные технологии обеспечивают получение значения прочности при сжатии до 12,4 МПа), плотность (от 100 до 300 кг/м<sup>3</sup>), пористость, водопоглощение и др.

2. Для обеспечения прочности пеностеклового материала необходим аморфно-кристаллический каркас (до 20 % (по массе)), в котором армирующую роль будут выполнять кристаллические включения определенного размера (кристаллическая фаза должна быть микро- и наноразмеров и не вызывать концентрацию напряжений на границе раздела фаз, в диапазоне 35 – 65 нм), равномерно

распределенные во всем объеме материала, в том числе у границ перегородок каркаса и внутренней поверхности пор по матрице пеноматериала в упорядоченном виде.

3. Возникновение кристаллической фазы (α-кварц, волластонит, геленит, геопсид, кристобалит, девитрит и т.д.) в каркасе пеностеклового материала возможно при наличии кристаллов в исходной шихте при одностадийном способе получения (а также в стеклогрануляте в случае двухстадийного способа получения) или при введении в состав шихты химических соединений, инициирующих процесс кристаллизации. В последнем случае это может быть достигнуто путем введения в состав композита компонентов, которые при температурной обработке (вспенивании) инициируют образование кристаллические фазы в аморфной матрице либо введением в состав аморфной матрицы кристаллического наполнителя.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из основных компонентов проектируемого шихтового состава пеностекла является золошлаковая смесь, использование которой позволит снизить стоимость готового продукта. Ее применение возможно за счет близкого химического состава к шихте из природного сырья, традиционно используемой для производства пеностекла [32]. Для разработки серии составов для синтеза пеностекла необходимо полное представление о химическом и фазовом составе основного ее компонента – золошлакового отхода. В связи с этим проведено его комплексное исследование, включающее определение химического состава, определение состава (идентификация) кристаллических фаз (в том числе степень кристалличности, размеры кристаллитов), количественное определение известных фаз в смеси.

*Обоснование используемых методов исследования.* Энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) на данный момент является самой распространенной приставкой к электронным микроскопам. Он легко устанавливается на колонну любого электронного микроскопа (растрового или просвечивающего) и позволяет решать примерно 90% всех задач микроанализа. Энергодисперсионный анализ позволяет исследовать состав материалов по отдельным химическим элементам. На основе результатов элементного анализа для определения фазового состава кристаллических материалов проводится рентгеноструктурный анализ. Принцип работы ЭДС заключается в следующем: пучок электронов падает на поверхность образца и взаимодействует с материалом, в результате чего возникает, в том числе, характеристическое рентгеновское излучение, которое регистрируется полупроводниковым детектором ЭДС. Система обработки сигнала затем разделяет рентгеновские фотоны по энергиям и, таким образом получается

полный спектр, по которому можно судить об элементном составе образца.

Рентгенофазовый анализ (РФА) – это метод исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного рентгеновского излучения на кристаллической решётке анализируемого объекта. Данная методика реализуется при помощи рентгеновского дифрактометра. В результате такого исследования можно получить различную информацию по структуре исследуемого образца, в том числе идентифицировать фазы и провести количественный фазовый анализ.

Указанные выше методы энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгенофазового анализа применены исполнителями для определения химического состава предоставленных образцов.

Образец золошлаковой смеси представлены в виде крупного порошка. Методом квадратирования отбирали среднюю пробу образца массой ~ 10 г которую затем истирали в агатовой ступке до состояния пудры. Образцы фиксировались на углеродный скотч на специальных столиках и помещались в растровый электронный микроскоп FEI Quanta 600 FEG (2007, FEI, Нидерланды).

Для определения элементного состава визуально выбиралась область с наибольшей толщиной слоя исследуемого порошка для минимизации вклада углеродного скотча, на который крепится образец, в результаты по составу. Спектры снимались с помощью энергодисперсионного спектрометра рентгеновского излучения фирмы EDAX, установленного в микроскопе. Разрешение по энергии данного метода составляет 120 эВ, а по концентрации до 0.1 % для Ag и более тяжелых элементов, порядка 0.5 % для C, N и O. Для получения наибольшей статистики площадь съемки представляла собой прямоугольник со сторонами в интервале 0,5 – 1 мм, а ускоряющее напряжение составляло 30 кВ. Расчет содержания элементов в исследуемом материале проводился с помощью программы EDAX Genesis, прилагаемой вместе с растровым электронным микроскопом.

Для проведения рентгенофазового анализа, образцы засыпались в специальный стеклянный

держатель, распределялись ровным слоем и помещались в рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV (2008, Rigaku, Япония).

Исследование фазового состава проводилось методом рентгеновской дифракции в излучении Cu-K $\alpha$  (длина волны  $\lambda = 0.154178$  нм) с использованием щелей Соллера. Съемку дифракционного спектра для фазового анализа проводилась по схеме  $\Theta - 2\Theta$  сканирования с фокусировкой по Брегу-Брентано в интервале углов 15...70 град.  $2\Theta$ . Съемка осуществлялась в поточечном режиме с шагом сканирования  $\Delta(2\Theta) = 0,02$  град, скоростью 2 град/мин, рабочее напряжение 40 кВ, ток 40 мА.

Для уточнения профиля экспериментальных рентгенограмм использовался программный пакет PDXL RIGAKU. Вычитание фона производилось методом Сонневельда – Виссера, сглаживание экспериментального профиля методом Савицкого – Голая, разделение компонент  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  методом Рачингера. Для описания дифракционных максимумов использовали суперпозицию функции Гаусса и функции Лоренца. Порошковые рентгеновские дифрактограммы уточняли методом Ритвельда, расчет массовой доли фаз проводили методом корундовых чисел, расчет размера кристаллитов (ОКР) методом Гальдера – Вагнера (Halder–Wagner methods).

Аппроксимация каждого из рефлексов на дифрактограммах исследуемых образцов функцией псевдо – Войгта позволяет точно определить положение рефлексов с учетом смещения, вызванного перекрытием рефлексов, на половине максимума интенсивности (FWHM) и интенсивность. Фазовый состав покрытий определялся с помощью БД ICCD PDF-2 (2008г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

С использованием методов (р. «Материалы и методы») получены и приведены результаты исследования золошлаковой смеси.

На рисунке 1 представлены энергодисперсионные спектры исследуемой золошлаковой смеси с отмеченным на них содержанием элементов

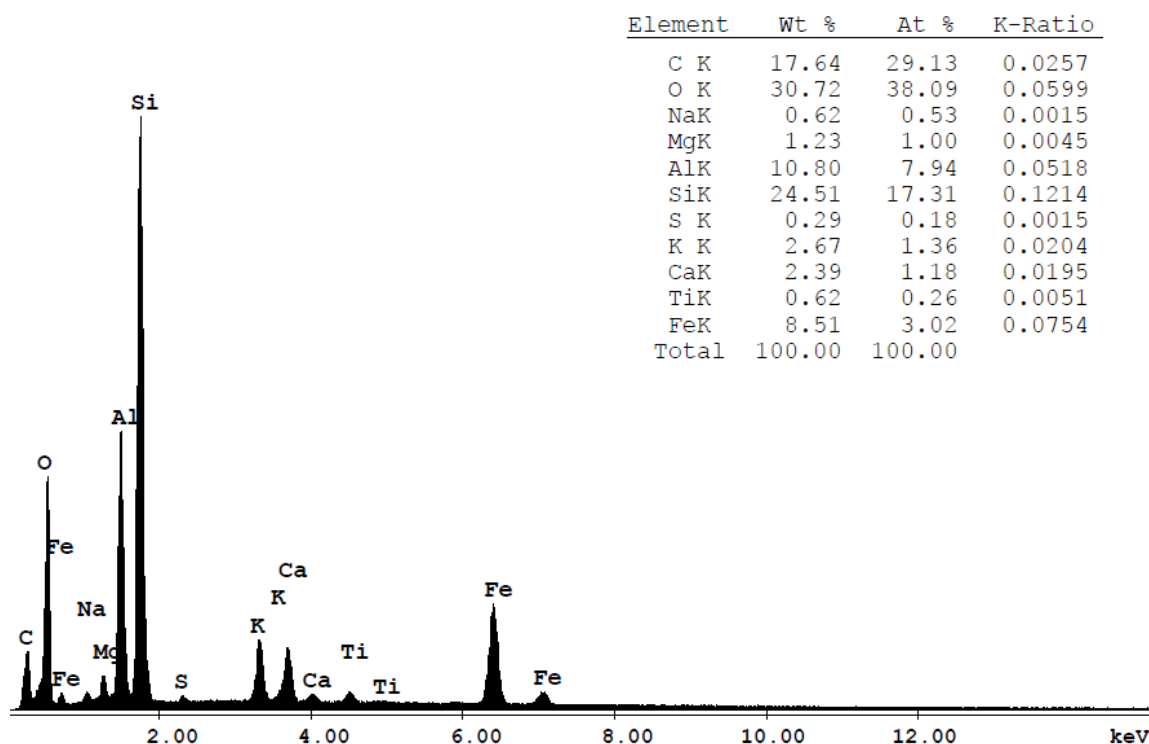


Рис. 1. Энергодисперсионный спектр золошлаковой смеси

Fig. 1. Energy dispersive spectrum of ash@slag mixture

Для удобства дальнейшей работы на основании данных энергодисперсионных спектров осуществлен расчет оксидного состава золошлаковой смеси и приведен к 100 % (таблица 1) [33].

Таблица 1. Химический состав золошлаковой смеси, приведенный к 100 %

Table 1. The chemical composition of the ash@slag mixture, reduced to 100 %

Наименование	Содержание, мас. %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Σ
Золошлаковая смесь (ЗШС)	54,52	21,21	12,65	3,47	3,34	2,12	0,87	1,07	0,75	100,00

По содержанию компонентов исследуемую ЗШС можно отнести к сверхкислым. Наличие стеклообразующих оксидов свидетельствует о возможности стеклования материала. Значительное содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (свыше 20 %) указывает на достаточно высокую температуру плавления, легоплавкие оксиды (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) способны нивелировать это значение несущественно.

С целью установления исходных параметров шихты проведен рентгенофазовый анализ (РФА) золошлаковой смеси, который показал ее аморфно-кристаллический характер структуры (рисунок 2), из которых следует, что исследуемый материал представлен в основном аморфной фазой, также обнаружены следующие кристаллические фазы:

кварц –  $\text{SiO}_2$ , оксид железа (II, III) –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и оксид алюминия калия –  $\text{Al}_6\text{KO}_{9,5}$ .

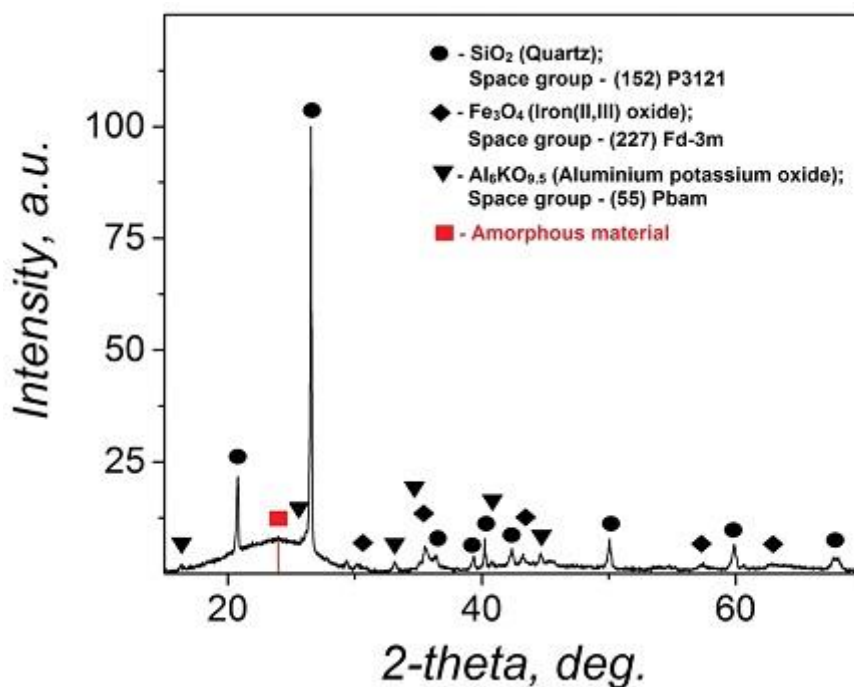


Рис. 2. Порошковая рентгеновская дифрактограмма золошлаковой смеси

Fig. 2. X-ray powder diffraction pattern of ash@slag mixture

Также установлены параметры обнаруженных кристаллических фаз: результаты расчета массовой доли кристаллических фаз и расчета размера кристаллитов (размера ОКР) (таблица 2, точность

определения количественного фазового состава составляет  $\pm 5\%$  масс). Установлено, что размеры выявленных кристаллических фаз находятся в требуемом диапазоне (35-65 нм).

Таблица 2. Параметры кристаллических фаз

Table 2. Parameters of crystalline phases

Кристаллическая фаза	$\omega$ , масс. %	Размер ОКР, нм
$\text{SiO}_2$	74.0	64,6
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	10.1	16,0
$\text{Al}_6\text{KO}_{9,5}$	15.9	74,2

Наличие кристаллической фазы в исходных материалах позволяет создать теоретические составы по двум описанным ранее направлениям: целенаправленным введением катализаторов кристаллизации и получением кристаллической фазы в материале за счет ее наличия в исходном сырье.

Для обоснования выбора кристаллизации и исходя из результатов обзора рассмотрим требования к катализаторам кристаллизации в стеклах.

Катализатор должен иметь неограниченную растворимость в стекле при высоких температурах (температуры варки и выработки) и ограниченную растворимость при низких температурах (вблизи температур размягчения и ниже). Катализатор должен обладать низкой энергией активации при образовании центров кристаллизации из расплава в области пониженных температур. Ионы или атомы катализатора должны иметь повышенную скорость диффузии при низких температурах по сравнению с основными компонентами стекла. Граница

зародыша кристалл-стекло должна иметь низкую поверхностную энергию, чтобы обеспечивать смачивание кристалла стеклом. Параметры кристаллической решетки катализатора и выделяющейся кристаллической фазы должны быть близки и не отличаться более, чем на 10-15 %. Большинство исследователей считает, что наиболее важным фактором в определении эффективности гетерогенного образования зародышей (центров кристаллизации) является тесная корреляция между параметрами кристаллической решетки катализатора и выделяющейся кристаллической фазы.

Для шлаковых стекол рекомендованы катализаторы  $S^{2-}$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $F^-$ . Применительно к имеющемуся составу ЗШС в качестве катализатора будет использован  $Cr_2O_3$ .  $Cr_2O_3$  относится к группе неметаллических катализаторов.  $Cr_2O_3$  рекомендуют использовать в сочетании с другими катализаторами, поскольку при использовании лишь только  $Cr_2O_3$  предполагается частичная кристаллизация аморфной фазы. На основании вышеизложенного, в теоретическом составе шихты пеностекла в качестве модификатора будет использован  $Cr_2O_3$  без дополнительных катализаторов. Катализатор способствует ликвации стекол на две фазы и это обуславливает появление центров кристаллизации и облегчает рост кристаллических зерен. Причиной резкого

увеличения скорости зародышеобразования вследствие ликвации может быть развитие поверхности между стеклообразными фазами и приближение химического состава микрофаз к составу будущих кристаллов, повышающее скорость их кристаллизации.

Количество катализатора варьируется от долей процента до 10 %. Рекомендованное содержание  $Cr_2O_3$  более 2 %, чтобы расслоение наблюдалось уже в расплаве ввиду относительно низкой растворимости  $Cr_2O_3$  [34].

На основании проведенных ранее работ по проектированию состава и технологии получения теплоизоляционного материала пеностекла [32, 35-37], а также проведенного обзора и анализа влияния кристаллической фазы в матрице пеностекла на его эксплуатационные свойства [38], спроектированы составы пористых стекол с различным содержанием кристаллической фазы (Таблица 3).

Теоретический состав шихты для пеностекла является условно приближенным, т.к. влияние вида катализатора на кристаллизацию точно устанавливается при синтезе материала и производится корректировка. После синтеза образцов для подтверждения информации об образовавшихся кристаллических фазах, температурах их образования и т.д. проводят ДТА и РФА образцов материала.

**Таблица 3.** Составы пористых стекол с различным содержанием кристаллической фазы

**Table 3.** The composition of porous glasses with different contents of the crystalline phase

№ состава	Содержание компонентов, мас. %				
	Золошлаковый отход	Стеклобой	Бура*	Антрацит*	Катализатор кристаллизации
ПС-3-7-К2	30	70	5	5,0	2,0
ПС-3-7-К2,5	30	70	5	5,0	2,5
ПС-3-7-К3	30	70	5	5,0	3,0
ПС-3-7-К3,5	30	70	5	5,0	3,5
ПС-3-7-К0	30	70	5	5,0	-

## ВЫВОДЫ

По результатам выполненных работ и в соответствии с поставленной целью сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что одним из основных факторов, определяющих физические свойства пеностекла, являются особенности строения его макро- и микроструктуры, которые регулируются изменением температурно-временного режима и модификацией состава путем введения добавок. Микроструктура межпоровой перегородки пеностекла представляет собой аморфную фазу, которая может быть модифицирована на этапе

синтеза материала различными катализаторами и образовывать частично кристаллическую форму.

Определено, что степень влияния кристаллической фазы на формирование и развитие структуры пеностеклового материала (пеностекла) и его свойства неоднозначно. Выявлено, что причиной отрицательного влияния кристаллической фазы в каркасе пеностеклового материала являются крупные кристаллы, наличие которых затрудняет вспенивание за счет повышения поверхностного натяжения и вязкости. К положительным эффектам присутствия кристаллической фазы относится возможность регулирования ее количества, состава и размера

кристаллитов, что позволяет управлять свойствами материала на макроуровне и синтезировать продукт с заданными эксплуатационными характеристиками строительного материала, такими как механическая прочность (отдельные технологии обеспечивают получение значения прочности при сжатии до 12,4 МПа), плотность (от 100 до 300 кг/м<sup>3</sup>), пористость, водопоглощение и др.

2. Возникновение кристаллической фазы ( $\alpha$ -кварц, волластонит, геленит, геопсид, кристобалит, девитрит и т.д.) в каркасе пеностеклового материала возможно при наличии кристаллов в исходной шихте при одностадийном способе получения (а также в стеклогрануляте в случае двухстадийного способа получения) или при введении в состав шихты химических соединений, инициирующих процесс кристаллизации. В последнем случае это может быть достигнуто путем введения в состав композита компонентов, которые при температурной обработке (вспенивании) инициируют образование кристаллические фазы в аморфной матрице либо введением в состав аморфной матрицы кристаллического наполнителя.

Таким образом, использование вторичных ресурсов (золошлаковой смеси представленного состава) позволяет реализовать формирование заданной микроструктуры двумя способами: целенаправленным введением катализатора кристаллизации и использованием уже существующих кристаллических фаз в исходном материале.

3. Результаты физико-химического исследования золошлаковой смеси и ранее проведенных работ по проектированию состава и технологии получения теплоизоляционного материала пеностекла позволили создать серию шихтовых составов для синтеза пеностекла с различным процентным содержанием катализатора кристаллизации.

При дальнейших исследованиях будут синтезированы спроектированные составы, подобран температурно-временной режим. Полученные образцы будут подвергнуты дифференциальному термическому и рентгенофазовому анализам, что позволит получить достаточные сведения о влиянии исходных материалов на микроструктуру пеностекла, в том числе идентификации кристаллических фаз и температур их образования. При теоретическом расчете режима получения будет проведен анализ данных диаграммы состояния стекла соответствующей системы. Теоретические составы будут подвержены корректировке в соответствии с результатами синтеза и параметрами температурно-временного режима.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казьмина О.В., Кузнецова Н.А. Получение высокоэффективного теплоизоляционного строительного материала на основе золошлаковых

отходов тепловых электростанций // Огнеупоры и техническая керамика. 2012. № 1-2. С. 78 – 82.

2. Смолий В.А., Косарев А.С., Яценко Е.А. Ячеистые теплоизоляционные строительные стекломатериалы на основе отходов тепловых электростанций и черной металлургии // Стекло и керамика. 2017. № 2. С. 20 – 22.

3. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Павлов В.Е., Дружинин Д.К., Вторушин Н.С., Баторова И.Ю. Золошлаковые отходы теплоэнергетики как сырье для получения пеностекла // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 2 (59). С. 9 – 14.

4. Дамдинова Д. Р., Павлов В. Е., Хардаев П. К., Дружинин Д.К., Вторушин Н. С., Баторова И. Ю. Влияние состава на структуру и свойства пеностекла с использованием золошлаковых отходов ТЭЦ // Научное обозрение. 2016. № 10. С. 47 – 55.

5. Lázár, M., Hnatko, M., Sedláček, J., Čarnogurská, M., Brestovič, T. Upgrading the glassy slag from waste disposal by thermal plasma treatment // Waste Management. 2018. Vol. 78. pp. 173 – 182.

6. Li, J., Zhuang, X., Querol, X., Font, O., Moreno, N. A review on the applications of coal combustion products in China // International Geology Review. 2018. Vol. 60, Issue 5-6. pp. 671 – 716.

7. Rawlings, R.D., Wu, J.P., Boccaccini, A.R. Glass-ceramics: Their production from wastes-A Review // Journal of Materials Science. 2006. Vol. 41, Issue 3. pp. 733 – 761.

8. Колекова А.В., Рачинская М.П. Пеностекло и его применение в России // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5 (13). С. 18.

9. Минько Н.И., Пучка О.В., Евтушенко Е.И., Нарцев В.М., Сергеев С.В. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал // Фундаментальные исследования. 2013. № 64. С. 849 – 854.

10. Федосов С.В., Баканов М.О., Никишов С.Н. Основные принципы технологии получения теплоизоляционного пеностекла, подходы к моделированию // Сборник «Эффективные композиты» Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 690 – 699.

11. Китайгородский И. И., Кешишян Т. Н. Пеностекло М.: Промстройиздат. 1953. 78 с.

12. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника. 1975. 248 с.

13. Разработка эффективных строительных конструкций, материалов и изделий в условиях сейсмичности и сурового климата Республики Бурятия [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) // ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»; рук. Дамдинова Д.Р.; исполн.: Павлов В.Е. [и др.]. – Улан-Удэ, 2014. – 85 с. - № ГР 01201254455. – Инв. № 215011450004.

14. Сопегин Г. В., Семейных Н. С. Подготовка исходных компонентов шихты в производстве гранулированного пеностекла // *Master's Journal*. 2016. № 2. pp. 44 – 54.
15. Саркисов П. Д., Семин М. А., Егорова Л. С. Стеклообразование и кристаллизация стекол системы  $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3(\text{FeO})\text{--CaO--MgO--R}_2\text{O}$  // *Стекло и керамика*. 1995. № 11. С. 6 – 7.
16. Суляев В. И., Казьмина О. В., Семухин Б. С. и др. Исследование электромагнитных характеристик стеклокристаллического пеноматериала // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 312 – 314.
17. Казьмина О. В., Верещагин В. И., Семухин Б. С. Структура и прочность пеностеклокристаллических материалов из низкотемпературного стеклогранулята // *Физика и химия стекла*. 2011. Т. 37. № 4. С. 501 – 509.
18. Дадминова Д. Р., Хардаев П. К., Карпов Б. А. и др. Технологические подходы к получению пеностекол с регулируемой поровой структурой // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 68 – 70.
19. Казьмина О. В., Семухин Б. С., Иванов Ю. Ф., Казьмин В. П. Особенности образования наноструктуры пеностеклокристаллических материалов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2013. № 12. С. 43 – 46.
20. Казьмина О. В., Верещагин В. И. Абияка А. Н. Оценка составов и компонентов для получения пеностеклокристаллических материалов на основе алюмосиликатного сырья // *Стекло и керамика*. 2009. № 3. С. 6 – 8.
21. Казьмина О. В., Верещагин В. И., Абияка А. Н. Перспективы использования тонкодисперсных кварцевых песков в производстве пеностеклокристаллических материалов // *Стекло и керамика*. 2008. № 9. С. 28 – 30.
22. Семухин Б. С., Казьмина О. В., Волкова А. Ю., Суляев В. И. Физические свойства пеностекла, модифицированного диоксидом циркония // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. Т. 59. № 12. С. 133 – 138.
23. Елистратова А. В., Казьмина О. В. Исследование кристаллизационных процессов, протекающих в стеклогрануляте при получении пеностекольного материала // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 9/3. С. 34 – 37.
24. Пучка О. В., Вайсера С. С., Лесовик В. С., Сергеев С. В. Управление процессом структурообразования как фактор формирования стеклокомпозитов функционального назначения // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2017. № 9. С. 6 – 14.
25. Пучка О. В., Сергеев С. В., Вайсера С. С., Калашников Н. В. Высокоэффективные теплоизоляционные материалы на основе техногенного сырья // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2013. № 2. С. 51 – 55.
26. Пучка О. В., Лесовик В. С., Вайсера С. С. Использование стеклокомпозитов для строительства в условиях Арктики // *Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф., посв. 70-летию В. С. Лесовика: в 3 ч. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород & 2016. С. 29 – 36.*
27. Пучка О. В., Вайсера С. С. К вопросу о повышении прочности пористых материалов // *Наукоёмкие технологии и инновации: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. в 3 ч. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. 2016. С. 332 – 337.*
28. Francis A. A., Abdel Rahman M. K. Structure Characterization and Optimization of Process Parameters on Compressive Properties of Glass-Based Foam Composites // *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2014. Vol. 33. Issue 3. pp. 800 – 807.
29. Lebullenger R., Chenu S., Rocherullé J. et al. Glass foams for environmental applications (Conference Paper) // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2010. Vol. 356. Issue 44 – 49. pp. 2562 – 2568.
30. Xu B., Liang K. M., Cao J. W., Li Y. H. Preparation of foam glass ceramics from phosphorus slag (Conference Paper) // *Advanced Materials Research. 6th China International Conference on High-Performance Ceramics, CICC-6; Harbin; China*. 2009. Vol. 105 – 106. Issue 1. 2010. pp. 600 – 603.
31. Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C. Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste // *International Journal of Applied Glass Science*. 2014. Vol. 5. Issue 2. pp. 136 – 145.
32. Яценко Е.А., Смолий В.А., Косарев А.С., Дзюба Е.Б., Грушко И.С., Гольцман Б.М. Физико-химические свойства и структура пеношлакостекла на основе отходов ТЭС // *Стекло и керамика*. 2013. № 1. С. 3-6.
33. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Изд. 2-е. М.: МГУ. 1970. 488 с.
34. Бережной А.И. Ситаллы и фотоситаллы. М.: Машиностроение. 1966. 348 с.
35. Грушко И.С., Яценко Е.А., Зубехин А.П., Пузин В.С. Оптимальные параметры температурно-временного режима синтеза шлакопеностекла с применением математического моделирования // *Стекло и керамика*. 2014. № 12. С. 12-14.
36. Яценко Е.А., Зубехин А.П., Смолий В.А., Грушко И.С., Косарев А.С., Гольцман Б.М. Ресурсосберегающая технология теплоизоляционно-декоративного стеклокомпозиционного материала на основе золошлаковых отходов // *Стекло и керамика*. 2015. № 6. С. 34-38.
37. Грушко И.С. Зависимость параметров пеношлакостекла от шихты и технологических добавок // *Научное обозрение*. 2015. № 6. С. 98-101.
38. Грушко И.С., Маслаков М.П. Формирование кристаллической фазы в матрице пеностекла и ее влияние на эксплуатационные свойства материала // *Стекло и керамика*. 2018. № 12. С. 10-16.

## REFERENCES

1. Kazmina O.V., Kuznetsova N.A. Obtaining a highly efficient heat-insulating building material based on ash and slag waste of thermal power plants // *Ogneupory i tehničeskaja keramika*. 2012. N 1-2. pp. 78 – 82. (In Russian)
2. Smoly V.A., Kosarev A.S., Yatsenko E.A. Cellular heat-insulating building glass materials based on waste from thermal power plants and ferrous metallurgy // *Stelo i keramika*. 2017. N 2. pp. 20 – 22. (In Russian)
3. Damdinova D.R., Khardaev P.K., Pavlov V.E., Druzhinin D.K., Vtorushin N.S., Batorova I.Yu. Ash and slag waste of the power system as a raw material for foam glass production // *Vestnik VSGUTU*. 2016. N 2 (59). pp. 9 – 14. (In Russian)
4. Damdinova D.R., Pavlov V.E., Khardaev P.K., Druzhinin D.K., Vtorushin N.S., Batorova I. Yu. Composition influence on the structure and properties of foam glass using ash and slag waste from thermal power plants // *Nauchnoe obozrenie*. 2016. N 10. pp. 47 – 55. (In Russian)
5. Lázár, M., Hnatko, M., Sedláček, J., Černogurská, M., Brestovič, T. Upgrading the glassy slag from waste disposal by thermal plasma treatment // *Waste Management*. 2018. Vol. 78. pp. 173 – 182.
6. Li, J., Zhuang, X., Querol, X., Font, O., Moreno, N. A review on the applications of coal combustion products in China // *International Geology Review*. 2018. Vol. 60, Issue 5-6. pp. 671 – 716.
7. Rawlings, R.D., Wu, J.P., Boccaccini, A.R. Glass-ceramics: Their production from wastes-A Review // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41, Issue 3. pp. 733 – 761.
8. Kolekova A.V., Rachinskaya M.P. Foam glass and its use in Russia // *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*. 2012. N 5 (13). pp. 18. (In Russian)
9. Minko N.I., Puchka O.V., Evtushenko E.I., Nartsev V.M., Sergeev S.V. Foam glass - a modern effective inorganic thermal insulation material // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. N 64. pp. 849 – 854. (In Russian)
10. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Nikishov S.N. The main principles of the technology for producing heat-insulating foam glass, modeling approaches // *Effectivnye stroitelnye kompoziti. Belgorodskij gosudarstvennij tehnologičeskij universitet im. V.G. Shuhova. Belgorod*. 2015. pp. 690 – 699. (In Russian)
11. Kitaygorodsky I.I., Keshishyan T.N. Penosteklo [Foamglass]. Moscow: Promstrojizdat. 1953. 78 p.
12. Demidovich B.K. Пеностекло. Penosteklo [Foamglass]. Minsk: Nauka i tehnika. 1975. 248 p.
13. Development of effective building structures, materials and products in seismic conditions and harsh climate of the Republic of Buryatia [Text]: report on research (intermediate) // FSBEI HPE “East Siberian State University of Technology and Management”; managed Damdinova D.R. ; performer: Pavlov V.E. [and etc.]. - Ulan-Ude, 2014 .- 85 p. - No. GR 01201254455. - Inv. N. 215011450004. (In Russian)
14. Sopegin GV, Semeykh N. S. Preparation of the initial components of the charge in the production of granulated foam glass // *Master`s Journal*. 2016. N 2. pp. 44 – 54.
15. Sarkisov P. D., Semin M. A., Egorova L. S. Glass formation and crystallization of system glasses SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(FeO)-CaO-MgO-R<sub>2</sub>O // *Stelo i keramika*. 1995. N 11. pp. 6 – 7. (In Russian)
16. Suslyayev V. I., Kazmina O. V., Semukhin B. S. et al. Study of the electromagnetic characteristics of glass-crystal foam // *Izvestija visshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2012. T. 55. N 9/2. pp. 312 – 314. (In Russian)
17. Kazmina O. V., Vereshchagin V. I., Semukhin B. S. Structure and strength of foam glass materials from low-temperature glass granulate // *Fizika i himija stekla*. 2011. T. 37. N 4. pp. 501 – 509. (In Russian)
18. Dadminova D. R., Khardaev P. K., Karpov B. A. et al. Technological approaches to the production of foam glass with an adjustable pore structure // *Stroitelnye materialy*. 2007. N 3. pp. 68 – 70. (In Russian)
19. Kazmina O. V., Semukhin B. S., Ivanov Yu. F., Kazmin V. P. Features of the formation of the nanostructure of foam glass materials // *Izvestija visshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*. 2013. N 12. pp. 43 – 46. (In Russian)
20. Kazmina O. V., Vereshchagin V. I. Abiyaka A. N. Evaluation of compositions and components for the production of foam glass materials based on aluminosilicate raw materials // *Stelo i keramika*. 2009. N 3. pp. 6 – 8. (In Russian)
21. Kazmina O. V., Vereshchagin V. I., Abiyaka A. N. Prospects for the use of finely dispersed quartz sand in the production of foam glass materials // *Stelo i keramika*. 2008. N 9. pp. 28 – 30. (In Russian)
22. Semukhin B. S., Kazmina O. V., Volkova A. Yu., Suslyayev V. I. Physical properties of foam glass modified with zirconium dioxide // *Izvestija visshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2016. T. 59. N 12. pp. 133 – 138. (In Russian)
23. Elistratova A.V., Kazmina O.V. Investigation of crystallization processes occurring in glass granulate upon receipt of foam glass material // *Izvestija visshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2014. T. 57. N 9/3. pp. 34 – 37. (In Russian)
24. Puchka O. V., Vayser S. S., Lesovik V. S., Sergeev S. V. Control of the process of structure formation as a factor in the formation of functional glass composites // *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2017. N 9. pp. 6 – 14. (In Russian)
25. Puchka O. V., Sergeev S. V., Weisser S. S., Kalashnikov N. V. Highly efficient heat-insulating materials based on technogenic raw materials // *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2013. N 2. pp. 51 – 55. (In Russian)
26. Puchka O. V., Lesovik V. S., Weisser S. S. Use of glass composites for construction in the Arctic // *Intellektual'nye stroitelnye kompoziti dlia zelenogo stroitelstva. Belgorodskij gosudarstvennij tehnologičeskij universitet im. V.G. Shuhova. Belgorod*. 2016. pp. 29 – 36. (In Russian)

27. Puchka O. V., Weisser S. S. On the issue of increasing the strength of porous materials // Naukoemkie tehnologii i innovacii, Belgorodskij gosudarstvennij tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. Belgorod. 2016. pp. 332 – 337. (In Russian)
28. Francis A. A., Abdel Rahman M. K. Structure Characterization and Optimization of Process Parameters on Compressive Properties of Glass-Based Foam Composites // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2014. Vol. 33. Issue 3. pp. 800 – 807.
29. Lebullenger R., Chenu S., Rocherullé J. et al. Glass foams for environmental applications (Conference Paper) // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. Vol. 356. Issue 44 – 49. pp. 2562 – 2568.
30. Xu B., Liang K. M., Cao J. W., Li Y. H. Preparation of foam glass ceramics from phosphorus slag (Conference Paper) // Advanced Materials Research. 6th China International Conference on High-Performance Ceramics, CICC-6; Harbin; China. 2009. Vol. 105 – 106. Issue 1. 2010. pp. 600 – 603.
31. Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C. Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste // International Journal of Applied Glass Science. 2014. Vol. 5. Issue 2. pp. 136 – 145.
32. Yatsenko E.A., Smolij V.A., Kosarev A.S., Dzyuba E.B., Grushko I.S., Goltsman B.M. Physico-chemical properties and structure of foam slag glass based on waste TPP // Stelo i keramika. 2013. N 1. pp. 3-6. (In Russian)
33. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv [Chemical Soil Analysis Guide]. Moscow: MGU. 1970. 488 p.
34. Berezhnoy A.I. Sitalli i fotositalli [Sitalls and photoalls]. Moscow: Mashinostroenie. 1966. 348 p.
35. Grushko I.S., Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Puzin V.S. Optimal parameters of the temperature-time regime for the synthesis of slag glass using mathematical modeling // Stelo i keramika. 2014. N 12. pp. 12-14. (In Russian)
36. Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Smolij V.A., Grushko I.S., Kosarev A.S., Goltsman B.M. Resource-saving technology of heat-insulating and decorative glass composite material based on ash and slag waste // Stelo i keramika. 2015. N 6. pp. 34-38. (In Russian)
37. Grushko I.S. Dependence of foam slag glass parameters on charge and technological additives // Nauchnoe Obozrenie. 2015. N 6. pp. 98-101. (In Russian)
38. Grushko I.S., Maslakov M.P. The formation of the crystalline phase in the foam glass matrix and its effect on the operational properties of the material // Stelo i keramika. 2018. N 12. pp. 10-16. (In Russian)

SUBSTANTIATION AND DESIGN OF COMPOSITIONS OF HEAT-INSULATING MATERIAL  
(FOAM GLASS) USING RECYCLABLE RESOURCES

Grushko I., Skibin G., Druzhinina E.

<sup>1</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University,  
346428, Rostov reg., c. Novocherkassk, st. Prosvjaschenija, 132, grushkois@gmail.com

**Summary:** The article addresses the issues of directional crystallization of a heat-insulating material – foam glass.

**Subject:** The aim of the work is the design of charge compositions for the synthesis of foam glass using recyclable resources to ensure the presence of a crystalline component in the frame of the material.

**Materials and methods:** The research material is the ash and slag mixture, which is a product of coal burning at a thermal power plant. Ash and slag waste can be considered as secondary raw materials due to the diverse chemical composition and used as a component of the charge for the synthesis of foam glass.

Using the FEI Quanta 600 FEG scanning electron microscope using an EDAX energy dispersive X-ray spectrometer installed in the microscope, the chemical composition of the ash and slag waste sample was determined. Using the X-ray diffraction method on a Rigaku Ultima IV diffractometer, its phase composition was studied, including crystallite sizes and the quantitative ratio of known phases in the mixture. X-ray powder diffraction patterns were refined by the Rietveld method, the mass fraction of phases was calculated by the corundum number method, and the crystallite size (CSR) was calculated by the Halder – Wagner method.

**Results and Conclusions:** It is established that one of the main factors determining the physical properties of foam glass is the structural features of its macro- and microstructure, which are regulated by changing the temperature-time regime and modifying the composition by introducing additives. The use of secondary resources (ash-slag mixture of the present composition) allows the formation of a given microstructure to be realized in two ways: by targeted introduction of a crystallization catalyst and the use of existing crystalline phases in the starting material. The results of a physicochemical study of the ash and slag mixture and previously carried out work on the design of the composition and technology for the production of heat-insulating foam glass material made it possible to create a series of charge compositions for the synthesis of foam glass with various percent crystallization catalysts.

**Key words:** Heat-insulating material, foam glass, crystalline phase, microstructure, ash and slag mixture, recyclable raw materials.

УДК 625.855.53

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЛЕГКИХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Борисенко Ю.Г., Рудак С.В.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»,  
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1,  
<sup>1</sup>e-mail: borisenko2005@yandex.ru; <sup>2</sup> e-mail: s-rudak@mail.ru

**Аннотация.** Одной из актуальных проблем развития органоминеральных композиционных материалов для покрытий автомобильных дорог в настоящее время является снижение веса и плотности композита, что позволит снизить расчетные нагрузки на дорожные конструкции. Достичь этого возможно применением легких пористых заполнителей. Анализ опыта применения различных легких пористых заполнителей в составах битумоминеральных композиций выявил, что наиболее эффективными материалами для этих целей являются керамзитовый песок или гравий. Однако, наряду с положительными качествами композиций на основе керамзита (малая плотность и вес, высокие прочность, теплостойкость, сдвигоустойчивость) имеется и существенный недостаток – повышенная битумоемкость смесей. Перспективным направлением решения этой задачи является оптимизация зерновых составов таких битумоминеральных композиций. Экспериментально установлено, что модифицированные керамзитовым гравием битумоминеральные композиции вследствие изменения структуры в материале дорожного покрытия обладают большей трещиностойкостью, сдвигоустойчивостью и термостабильностью. На основе проведенных экспериментальных исследований влияния фракционного состава и содержания пористого заполнителя (керамзитового гравия) на битумоемкость и свойства битумоминеральных композиций разработаны эффективные горячие мелкозернистые битумоминеральные смеси на основе керамзитового гравия для верхних слоев покрытий автомобильных дорог, мостовых переходов, автостоянок, покрытий велосипедных дорожек и тротуаров с содержанием битума, соответствующим нормативным требованиям к традиционным дорожным асфальтобетонам, с пониженными плотностью и весом и высокими эксплуатационными показателями. Установлено, что наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики предложенных битумоминеральных композиций оказывают фракции керамзитового гравия с размером зерен 10-5 мм.

**Предмет исследования:** теоретическое и экспериментальное обоснование возможности регулирования и влияние содержания керамзитового гравия на эксплуатационные характеристики легких битумоминеральных композиций.

**Материалы и методы:** в экспериментальных исследованиях использовали следующие материалы: легкий пористый заполнитель керамзитовый гравий марки 600; высевки гранитного щебня, являющегося продуктом дробления гравия; песок из отсевов дробления гранитного щебня, активированный известняковый минеральный порошок МП-1. В качестве вяжущего применяли дорожный нефтяной битум марки БНД 60/90. В работе использовали стандартные и нестандартизированные методы исследований. Стандартные методы испытаний проводились в соответствии с требованиями ГОСТ для определения характеристик битумоминеральных композиций и ее компонентов. Нестандартизированные методы исследования использовались для оценки термостабильности и износостойкости покрытий на плотном и пористом заполнителе исследуемых битумоминеральных композиций.

**Результаты:** анализ проведенных исследований показал, что наиболее значительное влияние на структуру композита, а значит и на его свойства, оказывает фракция керамзитового гравия 10-5 мм, содержание которой наиболее высокое. Составы с содержанием этой фракции характеризуются пониженными плотностью при высоких эксплуатационных показателях. Поэтому, эти составы были выбраны как наиболее оптимальные для дальнейших исследований влияния пористого заполнителя на эксплуатационные свойства предложенных битумоминеральных композиций.

**Выводы:** 1. Показано, что наиболее эффективным пористым заполнителем для таких композиций является керамзитовый гравий, который, в сравнении с другими искусственными и природными пористыми заполнителями (вспученный вермикулит, вспученный перлит, вулканическая пемза и т.д.), обладает следующими преимуществами: малой плотностью и весом, низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью, имеет широкое распространение и доступность в различных регионах России.

2. Предложены эффективные составы горячих легких битумоминеральных смесей, модифицированных керамзитовым гравием, с повышенными эксплуатационными свойствами. Отличительной особенностью предложенных составов горячих легких битумоминеральных композиций на легком пористом заполнителе является использование в составе заполнителя керамзитового гравия фракций 20-5 мм. Установлено, что наибольшее влияние на эксплуатационные свойства и структуру предложенных битумоминеральных композиций оказывает керамзитовый гравий фракций 10-5 мм,

что обусловлено высоким содержанием этой фракции в композициях (18-20 % масс.). Плотность таких битумоминеральных композиций значительно ниже (на 20-23 %) плотности стандартных прототипов на плотном минеральном заполнителе.

3. Выявлено, что сдвигоустойчивость разработанных составов битумоминеральных композиций на пористом заполнителе значительно выше сдвигоустойчивости состава-прототипа на плотном заполнителе (коэффициент внутреннего трения  $\text{tg}\varphi$  выше на 9,97 %, а показатель сцепления  $S_t$  выше на 51,2 %), что связано с более высоким внутренним трением, развитой поверхностью и более стабильной внутренней структурой легких битумоминеральных композиций. Показатели сдвигоустойчивости горячих легких битумоминеральных композиций закономерно повышаются с увеличением керамзитового гравия в составе заполнителя.

4. Установлена повышенная теплостойкость битумоминеральных композиций при содержании керамзитового гравия в них более 20 % мас. Выявлено, что композиции с содержанием керамзита более 6 % мас. обладают повышенной в сравнении с асфальтобетоном-прототипом темостабильностью. Наличие в предложенных составах битумоминеральных композиций керамзита обуславливает высокую трещиностойкость получаемого материала и повышенную деформативность при отрицательных температурах. Экспериментальными исследованиями выявлена более высокая износостойкость битумоминеральных материалов на основе керамзитового гравия в сравнении с традиционными асфальтобетонами на плотном заполнителе.

5. На основании проведенных экспериментальных исследований показано, что снижение битумоемкости битумоминеральных композиций на основе пористых заполнителей возможно за счет регулирования минерального состава битумоминеральных смесей, а в частности путем замены крупных фракций щебня (20-5 мм) на пористый заполнитель.

**Ключевые слова:** битумоемкость, битумоминеральная композиция, зерновой состав, керамзит, легкий пористый заполнитель, снижение плотности битумоминеральных композиций

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование материалов покрытий, применяемых при строительстве автомобильных дорог – одна из актуальных задач в дорожном строительстве. Перспективным направлением решения этой проблемы является разработка новых легких композиционных материалов на основе органических вяжущих с повышенными эксплуатационными характеристиками. Применение композиционных материалов на основе легких пористых заполнителей при устройстве дорожных покрытий позволит снизить вес и плотность композита, уменьшить расчетные нагрузки на дорожные конструкции, экономить материальные и финансовые затраты. Анализ опыта применения легких пористых заполнителей в составах битумоминеральных композиций выявил, что наиболее эффективными материалами для этих целей являются керамзитовый песок или гравий. Однако, наряду с положительными качествами композиций на основе керамзита (малая плотность и вес, высокие прочность, теплостойкость, сдвигоустойчивость) имеется и существенный недостаток – повышенная битумоемкость смесей. Оптимизация содержания легкого заполнителя в композиции и зерновых составов битумоминеральных смесей может решить эту проблему. Целью исследования является разработка оптимальных зерновых составов легких битумоминеральных композиций на основе керамзитового гравия с невысоким расходом битумного вяжущего и с повышенными эксплуатационными характеристиками.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В ряде работ отечественных авторов проанализировано влияние пористых минеральных материалов на свойства битумоминеральных композиций [1-3]. Эффективность использования пористых минеральных заполнителей (вулканических туфов, керамзита и др.) обусловлено их высокой теплоизолирующей способностью, низкотемпературной трещиностойкостью, невысокими плотностью и весом [4-6]. Несмотря на обеспечение повышенных показателей прочности, водостойкости, теплостойкости, трещиностойкости, деформативности битумоминеральных смесей на основе пористых минеральных материалов их существенным недостатком является повышенная битумоемкость. Кроме того, в ряде случаев, недостаточно высокие эксплуатационные показатели предлагаемых битумоминеральных композиций ограничивают их внедрение. Использование вулканических стекол и пемзы, вспученных перлита и вермикулита и т.п. в составах битумоминеральных композиций существенно снижает плотность и вес композита, обеспечивает низкую теплопроводность, но, наряду с этим, снижает прочность, водостойкость и значительно повышает битумоемкость [6-9].

Анализ исследований битумоминеральных композиций на основе керамзита (керамзитового гравия или отсевов его дробления) в битумоминеральных смесях показал, что применение именно этого легкого пористого минерального заполнителя в битумоминеральных композициях наиболее перспективно и рационально [10,11]. Благодаря своей структуре керамзит (в сравнении с другими пористыми материалами) в

совокупности обладает следующими положительными качествами – малой плотностью и весом, низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью. Немало важно и то, что сырье (легкоплавкие глины), пригодное для производства керамзита, имеет широкое распространение и доступность в различных регионах России, технология его производства хорошо отработана, а стоимость в ряде случаев сопоставима со стоимостью высококачественных плотных минеральных заполнителей. Однако, применение керамзита в битумо-минеральных смесях сдерживается высокой битумоемкостью таких композиций [12].

В ряде работ показаны пути снижения этого показателя, сущность которых сводится к снижению открытой пористости заполнителя (керамзитового гравия и керамзитового песка) предварительной обработкой пористого материала остаточными продуктами нефтепереработки, что существенно усложняет технологию производства и стоимость конечного продукта. Однако, наличие песчаных фракций (5-0,315 мм) отсева дробления керамзита в предложенных смесях не позволяет существенно снизить битумоемкость композиций в силу высокой их открытой пористости и удельной поверхности [13]. Известны способы снижения битумоемкости битумо-минеральных композиций на основе пористого заполнителя (керамзитового гравия и песка) путем модификации битумного вяжущего менее дорогостоящими остаточными продуктами нефтепереработки (остаточными гудронами); применением двухстадийной технологии приготовления битумо-минеральных смесей; в предварительной двукратной обработке пористого заполнителя перед приготовлением смеси вязкими дорожными битумами; предварительной гидрофобизацией пористого заполнителя тяжелой смолой пиролиза [14-17]. Все выше перечисленные способы хоть и приводят к снижению битумоемкости, но в то же время усложняют технологию приготовления битумо-минеральных смесей, что соответственно, ведет к перерасходу энергии, материалов и удорожанию получаемого продукта.

Более рациональным направлением снижения битумоемкости является совершенствование подбора минерального и фракционного состава смеси. Влияние фракционного состава и каждой фракции керамзита на свойства битумо-минеральных композиций требует изучения, так как этот вопрос является одним из ключевых и определяющих при разработке и оптимизации минеральных составов смесей. Развитие этого направления имеет наибольшие практические перспективы.

Так, существенно снизить битумоемкость битумо-минеральных композиций на основе легких пористых заполнителей возможно путем включения только крупных фракций керамзитового гравия (20-5 мм), обладающих пониженными показателями открытой пористости и удельной поверхности, в сравнении с более мелкими фракциями керамзитового песка (менее 5 мм), и, тем более с отсевами дробления керамзитового гравия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментальных исследованиях использовали следующие материалы: легкий пористый заполнитель - керамзитовый гравий марки 600; крупный заполнитель - высевки гранитного щебня, являющегося продуктом дробления гравия; песок - отсева дробления гранитного щебня, активированный известняковый минеральный порошок МП-1. В качестве вяжущего применяли дорожный нефтяной битум марки БНД 60/90.

Эксплуатационные свойства исследуемых композиций оценивали по показателям теплоустойчивости, сдвигоустойчивости, трещиностойкости, термостабильности и износостойкости. В работе использовали стандартные и нестандартизированные методы исследований.

Показатели теплоустойчивости (прочность при сжатии при 50 °С  $R_{50}$ ), сдвигоустойчивости (коэффициент внутреннего трения  $\operatorname{tg}\varphi$  и показатель сцепления  $C_x$ ), трещиностойкости (прочность при растяжении при расколе,  $R_p$ ) определяли согласно требованиям ГОСТ 12801-98.

Термостабильность оценивали по коэффициенту температурной чувствительности  $k_{т.ч.}$ , который рассчитывали по формуле:

$$k_{т.ч.} = R_0 / R_{50};$$

где  $R_0$  – прочность при сжатии при 0 °С;  $R_{50}$  – прочность при сжатии при 50 °С.

Для оценки износостойкости покрытий из исследуемых битумо-минеральных композиций использовали прибор для определения истираемости (G) бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток ЛКИ-3М.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Были разработаны составы горячих битумо-минеральных композиций непрерывной гранулометрии типа Б, в которых заменяли те или иные крупные фракции плотного заполнителя (20-5 мм) на аналогичные фракции керамзитового гравия (составы №№ 1-7, таблица 1).

**Таблица 1.** Зерновые составы исследуемых битумоминеральных композиций

**Table 1.** Grain compositions of the studied bitumen-mineral compositions

№ состава	Фракции минерального заполнителя и наполнителя в составе смеси*				
	20-15	15-10	10-5	5-0,16	<0,16
1	К	Щ	Щ	П	МП
2	Щ	К	Щ	П	МП
3	Щ	Щ	К	П	МП
4	К	К	Щ	П	МП
5	Щ	К	К	П	МП
6	К	Щ	К	П	МП
7	К	К	К	П	МП
8	Щ	Щ	Щ	П	МП

\*Примечание: К – керамзитовый гравий, Щ – гранитный щебень, П – отсеvy дробления гранитного щебня, МП – активированный известняковый порошок

В предложенных составах битумоминеральных композиций варьировали содержание крупных фракций легкого пористого заполнителя. Замену фракции плотного заполнителя на пористый осуществляли исходя из равенства объемов долей проектируемых зерновых составов и зернового состава-прототипа на плотном заполнителе. Для этого определяли насыпную плотность каждой фракции щебня и соответствующей фракции керамзитового гравия. Для сравнения плотности и эксплуатационных характеристик изготавливали согласно ГОСТ 9128-2013 образцы-цилиндры предложенных составов на легком заполнителе

(состав №1-7, таблица 1) и образцы-цилиндры состава из стандартной мелкозернистой типа Б асфальтобетонной смеси-прототипа на плотном минеральном заполнителе (состав №8, таблица 1) и испытывали согласно ГОСТ 12801-98.

При подборе оптимального содержания битума в композициях ориентировались на максимальные прочностные характеристики и приемлемые показатели водостойкости. Оптимальные содержание керамзитового гравия, оптимальное содержание битумного вяжущего и плотность предложенных композиций представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Плотность и битумоемкость исследуемых битумоминеральных композиций

**Table 2.** Density and bitumen intensity of the studied bitumen-mineral compositions

№ состава	Содержание керамзитового гравия в смеси, С <sub>к</sub> , % мас.	Содержание битума		Плотность, ρ, кг/м <sup>3</sup>
		С, % мас.	С, % об.	
1	4,52	5,5	12,91	2,34
2	2,14	5,5	12,71	2,38
3	17,85	6,0	13,81	2,10
4	6,94	5,5	13,06	2,29
5	21,01	6,5	14,28	1,95
6	24,50	6,5	14,46	1,94
7	28,15	6,5	14,64	1,87
8	-	5,5	12,67	2,43

В результате экспериментальных исследований влияния содержания и зернового состава керамзитового гравия на битумоемкость (таблица 2) и эксплуатационные показатели разработанных битумо-минеральных композиций (таблица 3) выявлено следующее.

**Таблица 3.** Эксплуатационные показатели битумо-минеральных композиций

**Table 3.** Performance indicators of bitumen-mineral compositions

№ состава	Содержание керамзитового гравия в смеси, $C_k$ , % масс	Коэффициент внутреннего трения, $tg\phi$	Показатель сцепления, $C_\pi$ , МПа	Прочность при сжатии, при 50 °С, $R_{50}$ , МПа	Прочность при растяжении при расколе, $R_p$ , МПа	Коэффициент температурной чувствительности, $k_{m.ч}$	Показатель истираемости, $G$ , г/см <sup>2</sup>
1	4,52	0,960	0,443	1,73	5,21	5,69	2,47
2	2,14	0,955	0,439	1,68	5,15	5,63	2,49
3	17,85	0,830	0,632	1,92	4,75	5,20	2,07
4	6,94	0,965	0,492	2,03	5,05	4,96	2,39
5	21,01	0,841	0,683	2,11	4,58	4,57	1,98
6	24,50	0,975	0,687	2,17	4,44	4,52	1,95
7	28,15	0,983	0,752	2,02	4,36	4,36	1,90
8	-	0,885	0,385	2,06	5,34	5,35	2,60
Требования ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетона Тип Б к IV, V дорожно-климатическим зонам							
I марка	≥0,83	≥0,36	≥1,3	4,0-6,5	-	-	
II марка				3,5-7,0	-	-	
III марка				3,0-7,0	-	-	

Замена только одной фракции щебня на керамзит в составе композиции практически не влияет на содержание битума в смеси и лишь в смеси с фракцией керамзита 10-5 содержание битума выше на 0,5 % масс, что можно объяснить высоким содержанием данной фракции. Битумоемкость композиций возрастает с увеличением количества керамзита в смеси более 10 % мас. Тем не менее, содержание битума в предложенных композициях на основе керамзитового гравия составило 5,5-6,5 % мас., что укладывается в требования ГОСТ по содержанию битума для асфальтобетонов типа Б.

С увеличением размера фракции и содержания керамзита в смеси снижается плотность битумо-минеральных композиций. При замене фракций 20-5 мм на керамзитовый гравий плотность минимальна и на 23,1 % ниже плотности прототипа на плотном заполнителе.

Показатели сцепления  $C_\pi$  предложенных композиций на пористом заполнителе значительно превышают аналогичный показатель состава-прототипа на плотном заполнителе. Кроме того, сцепление увеличивается по мере увеличения содержания керамзитового гравия в композиции. Коэффициенты внутреннего трения большинства разработанных составов (№№ 1, 2, 4, 6 и 7) также превышают  $tg\phi$  прототипа, и лишь  $tg\phi$  составов №№

3 и 5 ему уступает. Повышение показателей сдвигоустойчивости обусловлено более развитой топографией поверхности керамзитовых гранул и более высокой их удельной поверхностью. Выявлено, что с увеличением содержания керамзитового гравия в разработанных составах сдвигоустойчивость битумо-минеральных композиций повышается.

Теплостойкость битумо-минеральных композиций на основе керамзитового гравия ( $R_{50}$ ) достаточно высокая и с увеличением количества керамзитового гравия в смеси повышается. Это связано с более прочной структурой материала, что обеспечивается более активным физико-химическим и химическим взаимодействием битумного вяжущего с поверхностью пористого заполнителя и его модификацией, обусловленной в процессе избирательной фильтрации. Однако, наличие наиболее крупной фракции керамзита (20-15 мм) в составах способствует некоторому снижению теплостойкости материала (составы №№ 1, 4, 7).

Установлена высокая трещиностойкость битумо-минеральных композиций на основе керамзитового гравия. Так, показатели прочности при растяжении при расколе  $R_p$  композиций на пористом заполнителе (составы №№ 1-7, таблица 3) несколько ниже  $R_p$  прототипа на плотном

заполнителе (состав №8, таблица 3), что свидетельствует о более высокой деформативности предложенных материалов при низких температурах, а значит и о более высокой их трещиностойкости. Более высокая трещиностойкость органоминеральных материалов на основе пористых заполнителей обеспечивается за счет снижения внутренних температурных напряжений. Увеличение содержания керамзитового гравия в смеси устойчиво снижает показатель прочности при растяжении при расколе  $R_p$ .

Как известно, композиционные материалы на основе битумных вяжущих способны в большой степени изменять свои свойства в интервале эксплуатационных температур. Повышение термостабильности битумоинеральных материалов, т.е. устойчивости к образованию сдвиговых деформаций при высоких летних температурах и трещинообразованию при низких является актуальной задачей, и, включение в состав композиций пористого заполнителя отчасти может ее решить. Анализируя термостабильность исследуемых композиций необходимо отметить, что композиции на пористом заполнителе обладают более высокой термостабильностью по сравнению с составами на плотном заполнителе. Термостабильность битумоинеральных композиций оценивают по коэффициенту температурной чувствительности  $k_{т.ч.}$ . С увеличением содержания керамзита в составе смеси коэффициенты температурной чувствительности  $k_{т.ч.}$  предложенных составов (составы №№ 1-7, таблица 3) устойчиво снижаются, что свидетельствует о повышении их термостабильности.

В настоящее время не существует строго нормируемых методов определения износа асфальтобетонных покрытий. Поэтому, для сравнительных испытаний применяли прибор ЛКИ-3М для определения истираемости бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток. Износостойкость оценивалась по величине показателя истираемости  $G$ , который определяли по изменению массы испытуемых образцов битумоинеральных композиций при трении о вращающийся в горизонтальной плоскости истирающий диск с абразивным материалом. Согласно полученным данным испытаний (таблица 3) для предложенных битумоинеральных композиций на основе пористого заполнителя (составы №№ 1-7) потери в массе составили на 5-26,9 % меньше в сравнении с композицией-прототипом на плотном заполнителе (состав № 8). С увеличением содержания керамзитового гравия в составе битумоинеральной смеси значения показателя истираемости  $G$  снижаются. Наличие керамзита в составе битумоинеральных композиций позволяет существенно снизить истираемость материала, и, следовательно, улучшает износостойкость покрытия.

Рассмотрев и проанализировав эксплуатационные показатели предложенных битумоинеральных композиций на основе пористого заполнителя и сравнив с аналогичными характеристиками битумоинеральной композиции-прототипа на плотном заполнителе следует отметить, что наиболее оптимальными по составу являются композиции с содержанием керамзитового гравия 24,50-28,15 % масс. (составы №№ 6, 7). Составы № 3 и № 5 (содержание керамзитового гравия 17,85 и 21,01 % масс.) по коэффициенту внутреннего трения  $tg\varphi$  уступают битумоинеральной композиции-прототипу на плотном заполнителе.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что наиболее эффективным пористым заполнителем для таких композиций является керамзитовый гравий, который, в сравнении с другими искусственными и природными пористыми заполнителями (вспученный вермикулит, вспученный перлит, вулканическая пемза и т.д.), обладает следующими преимуществами: малой плотностью и весом, низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью, имеет широкое распространение и доступность в различных регионах России.

2. Предложены эффективные составы горячих легких битумоинеральных смесей, модифицированных керамзитовым гравием, с повышенными эксплуатационными свойствами. Отличительной особенностью предложенных составов горячих легких битумоинеральных композиций на легком пористом заполнителе является использование в составе заполнителя керамзитового гравия фракций 20-5 мм. Установлено, что наибольшее влияние на эксплуатационные свойства и структуру предложенных битумоинеральных композиций оказывает керамзитовый гравий фракций 10-5 мм, что обусловлено высоким содержанием этой фракции в композициях (18-20 % мас.). Плотности таких битумоинеральных композиций значительно ниже (на 20-23 %) плотности стандартных прототипов на плотном минеральном заполнителе.

3. Выявлено, что сдвигоустойчивость разработанных составов битумоинеральных композиций на пористом заполнителе значительно выше сдвигоустойчивости состава-прототипа на плотном заполнителе (коэффициент внутреннего трения  $tg\varphi$  выше на 9,97 %, а показатель сцепления  $S_p$  выше на 51,2 %), что связано с более высоким внутренним трением, развитой поверхностью и более стабильной внутренней структурой легких битумоинеральных композиций. Показатели сдвигоустойчивости горячих легких битумоинеральных композиций закономерно повышаются с увеличением керамзитового гравия в составе заполнителя.

4. Установлена повышенная теплостойкость битумоминеральных композиций при содержании керамзитового гравия в них более 20 % мас. Выявлено, что композиции с содержанием керамзита более 6 % мас. обладают повышенной в сравнении с асфальтобетоном-прототипом темпостабильностью. Наличие в предложенных составах битумоминеральных композиций керамзита обуславливает высокую трещиностойкость получаемого материала и повышенную деформативность при отрицательных температурах.

Экспериментальными исследованиями выявлена более высокая износостойкость битумоминеральных материалов на основе керамзитового гравия в сравнении с традиционными асфальтобетонами на плотном заполнителе.

5. На основании проведенных экспериментальных исследований показано, что снижение битумоемкости битумоминеральных композиций на основе пористых заполнителей возможно за счет регулирования минерального состава битумоминеральных смесей, а в частности путем замены крупных фракций щебня (20-5 мм) на пористый заполнитель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Барабаш Д.Е. Особенности структурообразования битумоминеральных композиций с применением пористого сырья // *Строительные материалы*. – 2014. – № 1-2. – С. 68-71.

2. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Федоров М.Ю. Оценка качества битумоминеральных композитов с применением пористых наполнителей // *Дороги и мосты*. – 2012. – № 27/1. – С. 241-250.

3. Прокопец В.С., Галдина В.Д., Подрез Г.А. Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири // *Строительные материалы*. – 2009. – № 11. – С. 26-28.

4. Печерский С.А. Использование вулканического туфа в горячих асфальтобетонах / С.А. Печерский, А.В. Битиев, Н.В. Архиничева и др. // *Строительные материалы*. – 2010. – № 2. – С. 32-33.

5. СССР 1428735. Битумоминеральная смесь / Губач Л.С., Пономарева С.Г., Погребинский Г.М., Соколов Ю.В., Литвинова Т.В.; Заявл. 24.09.1986. Оpubл. 07.10.1988. Бюл. № 37.

6. Патент РФ 2052607. Покрытие / Печеный Б.Г., Борисенко Ю.Г., Пономаренко Г.Н.; Заявл. 08.06.1992. Оpubл. 20.01.1996. Бюл. № 2.

7. Рудь В.П. Строительные материалы из вулканических водосодержащих стекол // *Строительные материалы*. – 1982. – № 1. – С. 18.

8. Гридчин А.М., Коротаев А.П., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А., Высоцкая М.А. Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита // *Строительные материалы*. – 2009. – № 5. – С. 42-44.

9. Агейкин В.Н., Свинтицких Л.Е., Шабанова Т.Н., Ключов А.А. Исследования влияния вспученного вермикулитового песка на свойства битумных композиций и асфальтобетона // *Строительные материалы*. – 2003. – № 7. – С. 40-42.

10. ТУ 218 РСФСР-564-86. Смеси битумокерамзитовые дорожные. ТУ 218 РСФСР-564-86. – М; 1986. – 28 с.

11. Грушо-Новицкая А.О., Ярцев В.П. Влияние дисперсности и количества отходов керамзита на эксплуатационные характеристики битума БН 90/10 // «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова», Научно-теоретический журнал. Спецвыпуск: Материалы Международного конгресса «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии» Часть I. – 2003 г. – №5 – С. 28-31.

12. Литвинова Т.В., Соколов Ю.В., Петрова Л.С. Битумоемкость дорожного керамзита / Асфальтовые и цементные бетоны для условий Сибири: сб. науч. тр. – Омск: ОмПИ, 1989. – С. 66-67.

13. Патент РФ 2504612. Дорожная одежда / Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко А.Ю.; Заявл. 05.06.2012. Оpubл. 20.01.2014. Бюл. №2.

14. Патент РФ 2470048. Битумоминеральная смесь / Печеный Б.Г., Галдина В.Д.; Заявл. 30.05.2011. Оpubл. 20.12.2012. Бюл. № 35.

15. Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко О.А., Гордиенко Е.В. Пути снижения битумоемкости битумоминеральных композиций с заполнителем на основе керамзита // *Строительные материалы*. – 2013. – № 5. – С. 24-26.

16. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. – Воронеж: Воронеж. Гос. ун-т, 2006. – 272 с.

17. Братчун В.И., Беспалов В.Л. О целесообразности комплексной модификации дорожных асфальтобетонов // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2018. – № 11 (63). – С. 47-55.

#### REFERENCES

1. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Barabash D.E. Features of the structure formation of bitumen-mineral compositions using porous raw materials // *Building materials*. – 2014. N. 1-2. – pp. 68-71.

2. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Fedorov M.Yu. Quality assessment of bitumen-mineral composites using porous fillers // *Roads and bridges*. – 2012. – N. 27/1. – pp. 241-250.

3. Prokopets V.S. Asphalt Concrete Based on Porous Fillers of Western and Eastern Siberia / V.S. Prokopets, V.D. Galdina, G.A. Undercut // *Building materials*. – 2009. – N. 11. – pp. 26-28.

4. Pechersky S.A. The use of volcanic tuff in hot asphalt concrete / S.A. Pechersky, A.V. Bituev, N.V. Arkhinicheva et al. // *Building materials*. – 2010. – N. 2. – pp. 32-33.

5. USSR 1428735. Bitumen-mineral mixture / Gubach L.S., Ponomareva S.G., Pogrebinsky G.M.,

Sokolov Yu.V., Litvinova T.V. ; Claim 09/24/1986. Publ. 10/07/1988. Bull. Number 37.

6. RF patent 2052607. Coverage / Pecheny B.G., Borisenko Yu.G., Ponomarenko G.N. ; Claim 06/08/1992. Publ. 01/20/1996. Bull. Number 2.

7. Rud, V.P. Building materials from volcanic water-containing glasses / V.P. Rud // Building materials. - 1982. - N. 1. - pp. 18.

8. Gridchin A. M. Road composites based on dispersed expanded perlite / A. M. Gridchin, A. P. Korotaev, V. V. Yadikina, D. A. Kuznetsov, M. A. Vysotskaya // Building materials. - 2009. - N. 5. - pp. 42-44.

9. Ageikin, V. N. Investigation of the effect of expanded vermiculite sand on the properties of bitumen compositions and asphalt concrete [Text] / V. N. Ageikin, L. E. Svintitskikh, T. N. Shabanova, A. A. Klyusov // Building materials. - 2003. - N. 7. - pp. 40-42.

10. TU 218 RSFSR-564-86. Mixtures of bitumen-clayite road. TU 218 RSFSR-564-86. - M; 1986.- 28 p.

11. Grusho-Novitskaya, A. O. Influence of dispersion and amount of expanded clay waste on the operational characteristics of bitumen BN 90/10 [Text] / A. O. Grusho-Novitskaya, V. P. Yartsev // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov ", Scientific and theoretical journal. Special issue: Materials of the

International Congress "Modern Technologies in the Industry of Building Materials and Construction Industry" Part I. - 2003 - N. 5 - pp. 28-31.

12. Litvinova T.V. Bituminous capacity of road expanded clay / T.V. Litvinova, Yu.V. Sokolov, L.S. Petrova / Asphalt and cement concrete for the conditions of Siberia: collection. scientific tr - Omsk: OmPI, 1989. -- pp. 66-67.

13. RF patent 2504612. Road clothes / Borisenko Yu.G., Linnik VV, Borisenko A.YU. ; Claim 06/05/2012. Publ. 01/20/2014. Bull. No. 2.

14. RF patent 2470048. Bitumen-mineral mixture / Baked B.G., Galdina V.D. ; Claim 05/30/2011. Publ. 12/20/2012. Bull. Number 35.

15. Borisenko Yu.G. Ways to reduce the bitumen intensity of bitumen mineral compositions with aggregate based on expanded clay / Yu.G. Borisenko, V.V. Linnik, O.A. Borisenko, E.V. Gordienko // Building materials. - 2013. - N. 5. - pp. 24-26.

16. Kalgin Yu.I. Road bitumen-mineral materials based on modified bitumen / Yu.I. Kalgin. - Voronezh: Voronezh. Gos. Univ., 2006. 272 p.

17. Bratchun V.I., Bespalov V.L. On the feasibility of a comprehensive modification of road asphalt concrete // Construction and industrial safety. - 2018. - N 11 (63). -pp. 47-55.

## INFLUENCE OF CONTENT AND GRAIN COMPOSITION OF LIGHT POROUS FILLERS ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF BITUMINOMERAL COMPOSITIONS

Borisenko Y.G., Rudak S.V.

**Summary** One of the urgent problems of the development of organomineral composite materials for road coatings is currently reducing the weight and density of the composite, which will reduce the design load on the road structure. This can be achieved by using light porous aggregates. An analysis of the experience of using various light porous aggregates in the compositions of bitumen-mineral compositions revealed that the most effective materials for this purpose are expanded clay sand or gravel. However, along with the positive qualities of expanded clay compositions (low density and weight, high strength, heat resistance, shear stability), there is a significant drawback - increased bitumen intensity of mixtures. A promising direction for solving this problem is the optimization of grain compositions of such bitumen-mineral compositions. It has been experimentally established that bitumen-mineral compositions modified with expanded clay gravel due to structural changes in the paving material have greater crack resistance, shear resistance and thermal stability. On the basis of experimental studies of the influence of the fractional composition and content of porous aggregate (expanded clay gravel) on the bitumen intensity and properties of bitumen-mineral compositions, effective hot, fine-grained bituminous-mineral mixtures based on expanded clay gravel have been developed for the upper layers of road surfaces, bridge crossings, car parks, bicycle paths and sidewalks from bitumen content, complying with regulatory requirements for traditional road asphalt, with pony female density and weight and high performance. It has been established that the greatest influence on the operational characteristics of the proposed bitumen-mineral compositions is exerted by fractions of expanded clay gravel with a grain size of 10-5 mm.

**Subject:** theoretical and experimental justification of the possibility of regulation and the effect of expanded clay gravel content on the operational characteristics of light bitumen-mineral compositions.

**Materials and methods:** The following materials were used in experimental studies: lightweight porous aggregate expanded clay gravel 600; sowing granite crushed stone, which is a product of crushing gravel; sand from screenings of crushing of granite crushed stone, activated limestone mineral powder MP-1. As a binder used road oil bitumen grade BND 60/90. The study used standard and non-standardized research methods. Standard test methods were carried out in accordance with the requirements of GOST to determine the characteristics of bitumen-mineral compositions and its components. Non-standardized research methods were used to assess the thermal stability and wear resistance of coatings on a dense and porous aggregate of the studied bitumen-mineral compositions.

**Results:** An analysis of the studies showed that the most significant effect on the structure of the composite, and therefore on its properties, is exerted by a 10–5 mm expanded clay fraction, the content of which is highest. Compositions with the content of this fraction are characterized by reduced density at high performance. Therefore, these compositions were selected as the most optimal for further studies of the effect of the porous aggregate on the performance properties of the proposed bitumen-mineral compositions.

**Conclusions:** 1. It has been shown that the most effective porous aggregate for such compositions is expanded clay gravel, which, in comparison with other artificial and natural porous aggregates (expanded vermiculite, expanded perlite, volcanic pumice, etc.), has the following advantages: low density and weight, low thermal conductivity and high mechanical strength, is widespread and affordable in various regions of Russia.

2. Effective compositions of hot light bitumen-mineral mixtures modified with expanded clay gravel with enhanced performance properties have been proposed. A distinctive feature of the proposed compositions of hot light bitumen-mineral compositions on a light porous aggregate is the use of fractions of 20-5 mm in the aggregate of expanded clay gravel. It is established that the greatest impact on the performance properties and structure of the proposed bitumen-mineral compositions is exerted by expanded clay gravel fractions of 10-5 mm, which is due to the high content of this fraction in the compositions (18-20% of the mass.). The density of such bitumen-mineral compositions is significantly lower (20-23%) than the density of standard prototypes on a dense mineral aggregate.

3. It was revealed that the shear resistance of the developed compositions of bitumen-mineral compositions on a porous filler is significantly higher than the shear stability of the prototype composition on a dense aggregate (the internal friction coefficient  $\operatorname{tg}\phi$  is higher by 9.97%, and the adhesion coefficient  $C\pi$  is higher by 51.2%), which is associated with more high internal friction, a developed surface and a more stable internal structure of light bitumen-mineral compositions. The shear resistance of hot light bitumen-mineral compositions naturally increases with an increase in expanded clay gravel in the aggregate.

4. The increased heat resistance of bitumen-mineral compositions with an expanded clay gravel content of more than 20% wt. It was revealed that compositions with expanded clay content of more than 6% wt. have increased stability in comparison with asphalt concrete prototype. The presence in the proposed compositions of bitumen-mineral compositions of expanded clay leads to high crack resistance of the resulting material and increased defectiveness at low temperatures. Experimental studies revealed a higher wear resistance of bitumen-mineral materials based on expanded clay gravel in comparison with traditional asphalt concrete with dense aggregate.

5. Based on the conducted experimental studies, it was shown that a decrease in the bitumen intensity of bitumen-mineral compositions based on porous aggregates is possible by regulating the mineral composition of bitumen-mineral mixtures, and in particular, by replacing coarse fractions of crushed stone (20-5 mm) with a porous aggregate.

**Key words:** bitumen intensity, bitumen-mineral composition, grain composition, expanded clay, light porous aggregate, decrease in the density of bitumen-mineral compositions.

### Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 697.921.42+532.55

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Зиганшин А.М., Батрова К.Э., Гимадиева Г.А., Логачев К.И., Аверкова О.А.

ФГАОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,  
420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1,  
amziganshin@kgasu.ru; logachev.ki@bstu.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы области снижения энергозатратности вентиляционных систем. Приведен подробный анализ и обобщены результаты проведенных авторами исследований течений в фасонных элементах воздухопроводных сетей, в частности, в отсосах-раструбах, несимметричных вытяжных тройниках; также представлены результаты численного и экспериментального изучения очертаний вихревых зон, образующихся при срыве потока с входной кромки средних и последних вытяжных отверстий воздухопроводов. Численные исследования проведены с использованием программного комплекса Ansys Fluent. На основе полученных данных осуществлено численное моделирование и реализованы усовершенствованные конструкции фасонных элементов, спрофилированных по очертаниям вихревых зон. Результаты численных исследований проверены экспериментально. Показано, что для всех исследованных фасонных деталей использование профилирования приводит к существенному снижению их сопротивления. Получено снижение коэффициента местного сопротивления на величину от 30% до 60% в зависимости от конструкции и режимных параметров фасонных элементов. Для типоразмеров ряда фасонных элементов, в частности, входных участков вытяжных боковых и торцевых отверстий, обнаружено геометрическое подобие очертаний вихревых зон течений. Получены графические и аналитические зависимости для определения коэффициентов местного сопротивления энергоэффективных фасонных деталей и очертаний вихревых зон в них. Это позволит конструировать усовершенствованные фасонные детали при проектировании, строительстве новых и реконструкции существующих сетей воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования. Использование в них профилированных фасонных деталей обеспечивает уменьшение эксплуатационных затрат за счет экономии электрической энергии на привод вентилятора и снижение капитальных вложений в объект вследствие возможности использования вентиляционного агрегата меньшей мощности и типоразмера.

**Ключевые слова:** системы вытяжной вентиляции, вихревые зоны, профилирование фасонных деталей, снижение энергозатрат.

#### ВВЕДЕНИЕ

Инженерные системы зданий потребляют значительное количество тепловой и электрической энергии. В системах вентиляции тепловая энергия идет на подогрев наружного приточного воздуха, а электрическая энергия – в основном на привод вентиляторов, которые перемещают необходимое количество воздуха по воздухопроводным сетям. Затраты тепловой энергии прямо пропорциональны расходу перемещаемого воздуха. Его величина рассчитывается либо по санитарным нормативам, либо исходя из технологических нужд, ввиду чего уменьшить ее проблематично. Потребление электрической энергии вентиляционной системой пропорционально произведению расхода воздуха на потери давления в сети. Поскольку первый сомножитель, как было отмечено, изменять затруднительно, то, следовательно, затраты электроэнергии будут снижаться практически пропорционально уменьшению создаваемого вентилятором давления, расходуемого на

преодоление сопротивления воздухопроводных сетей. Потери исходного напора большей частью приходится на преодоление местных сопротивлений, то есть различных возмущений потока в фасонных элементах. Основные способы снижения падения давления в них сводятся к уменьшению или устранению отрывных или/и вихревых зон (ВЗ), возникающих при срыве потока с острой кромки или при отрыве пограничного слоя. Это вдув или отсос пограничного слоя, устройство поперечного оребрения стенки, скругление острых кромок, а также выравнивание потока при прохождении возмущающего элемента сети путем установки направляющих лопаток. Указанные способы, за исключением скругления стенки, на практике используются редко из-за эксплуатационных или конструктивных усложнений вентиляционных систем. Обычно способ скругления используют для внешних углов фасонных элементов, что не приводит к снижению сопротивления [1], а их внутренние кромки не скругляют из-за несколько большей сложности соединения деталей между собой при малых радиусах. При использовании фасонных деталей,

скругленных по большому радиусу, существенным недостатком становится невозможность их компактного размещения вследствие увеличения габаритов, что неприемлемо в стесненных, как правило, условиях монтажа вентиляционных сетей. Недостаток полностью преодолевается при применении способа профилирования по очертаниям вихревых зон [2]. При реализации этого способа возможны технические решения в виде установки профилирующей вставки внутрь стандартных фасонных деталей с острыми кромками, или в виде профилирования их стенок. Первое решение наиболее приемлемо для условий реконструкции крупных воздухопроводных сетей с

использованием существующих технологических линий изготовления стандартных деталей, а второе более подходит для нового строительства и мелкоштучного изготовления фасонных деталей.

Одно из серьезных препятствий широкому распространению профилирования на практике – немалое число сочетаний конфигураций фасонных частей и схем движения потоков в них, от чего зависят очертания вихревых зон и их аэродинамические характеристики. Поэтому важной задачей становится нахождение обобщенных параметров возмущающих элементов фасонных частей и очертаний вихревых зон в них.

**Таблица 1.** Разделение фасонных элементов по схемам движения потоков и параметрам вихревых зон

**Table 1.** Division of fitting elements according to flow patterns and parameters of vortex zones

Тип фасонного элемента	Причина деформации потока			Зависимость очертания ВЗ от		
	Слияние/разделение потоков	Изменение		соотношения расходов потоков	режима течения*	геометрии
сечения		направления				
Тройник	+	+	+	+	+	+
Крестовина	+	+	+	+	+	+
Отверстие среднее вытяжное	+	+	+	+	+	+
То же, приточное	+	+	+	+	+	+
Отвод	–	+	+	–	+	+
Внезапное расширение	–	+	+	–	+	+
Внезапное сужение	–	+	+	–	+	+
Отверстие торцевое вытяжное	–	+	+	–	+	+
То же, приточное	–	+	+	–	+	+
Отверстие последнее вытяжное	–	+	+	–	+	+
То же, приточное	–	+	+	–	+	+

\*Автомодельность соблюдается для всех типов фасонных элементов

В таблице приведены примеры сочетаний схем движения потоков и типов фасонных элементов. Из нее следует, что по возможности профилирования по очертаниям вихревых зон они могут быть разделены на элементы со смешением/разделением потоков – это тройники, крестовины, вытяжные (приточные) средние отверстия, и элементы, где поток протекает без слияния и разделения – это сужения/расширения, торцевые и боковые последние отверстия. В первом случае очертания вихревых зон зависят от геометрии фасонной детали и режима течения (кроме автоматического режима), а также от соотношения расходов основного и сливающегося (разделяющегося) потоков воздуха. Во втором же случае очертания вихревых зон зависят от геометрии фасонной детали и режима течения, с учетом автоматичности. Поэтому для типизации профилирующих вставок становится важным определение универсального профиля, при котором будет обеспечиваться минимальное (оптимальное) сопротивление фасонной детали, причем для первого случая это должно относиться еще и ко всему диапазону изменения отношения

протекающих расходов. Для практического использования энергоэффективных фасонных деталей необходимо также установление зависимостей по определению очертаний профилирующих вставок и расчету их сопротивлений.

Такие исследования наиболее рационально сейчас проводить посредством компьютерного моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики. Современные программные комплексы, реализующие эти методы, позволяют получать подробные характеристики течений, однако необходимо уже в начале исследований иметь данные для валидации получаемых численных результатов. В качестве источников таких данных могут быть использованы достоверные результаты натурных экспериментов, аналитических решений или уже подтвержденных численных исследований.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Большинство работ по исследованиям течений в фасонных элементах систем вентиляции посвящено определению их сопротивления, изучению ряда характеристик течения – полей скорости, давления, параметров турбулентности. Реже изучались отрывные течения и способы совершенствования фасонных элементов с точки зрения снижения сопротивления.

Наиболее полным источником данных об аэродинамическом сопротивлении различных элементов на 1992 год является справочник И.Е. Идельчика [1]. Он широко используется и в зарубежных базах данных; к примеру, ASHRAE за 2002 год [3] более чем на половину составлен по данным из [1]. По этим же данным рассчитываются 103 из 235 фитингов базы данных программы Autodesk Revit® MEP (версия 2018 года) [4], реализующей BIM-технологии и позволяющей проводить аэродинамические расчеты проектируемых систем вентиляции. Вместе с тем информации об очертаниях вихревых зон в справочниках [1, 3] нет. Для некоторых видов фасонных элементов в [1] приводятся сведения о возможных путях снижения сопротивления, с данными по эффекту снижения, чаще всего оценочного характера. По ним можно сделать вывод, что мероприятия по снижению сопротивления фасонных элементов в каналах могут в целом давать эффект в пределах 20% – 60%, а на входных участках – в пределах 30% – 90%.

*Тройники на слияние.* Далее будет рассматриваться часто используемая конфигурация равнобедренного несимметричного тройника. Сопротивление подобных тройников существенно зависит от отношения расхода воздуха  $G_B$ , протекающего по боковому ответвлению, к суммарному расходу воздуха  $G_C$ , протекающему после слияния потоков. В ряде отечественных и зарубежных работ [5, 6, 7] для таких тройников на основании законов сохранения массы, момента импульса и с использованием модели неупругого удара получены аналитические выражения для определения коэффициентов местного сопротивления (КМС) на проход  $\zeta_p$  и на боковое ответвление  $\zeta_b$ . Все полученные аналитические выражения дают определенную погрешность в сравнении с данными, полученными экспериментально в Германии [8], США [9], [10], Японии [11] и Швейцарии [12]. В справочнике [1] приводятся закономерности для  $\zeta_p$  и  $\zeta_b$ , полученные на базе аналитических выражений, скорректированных с использованием указанных выше экспериментальных данных. Исследований по определению очертаний отрывных зон, возникающих при течении воздуха в тройнике, немного, и в основном они сосредоточены на определении профилей скорости и давления в потоке смешивающихся неизоэнтальпических жидкостей с точки зрения теплообмена. Так, например, в работе [13] методами лазерной

анемометрии исследованы характеристики смешения потоков с разной температурой и возникающие при этом вихревые структуры на границе смешивающихся жидкостей. С использованием того же метода в работе [14] проведено определение профилей скорости, найдена отрывная зона в несимметричном равнобедренном тройнике на слияние при соотношении расходов  $G_B/G_C = 0,4$ , а также проведено сравнение ее очертаний с очертаниями, определенными методами вычислительной гидродинамики и показано довольно хорошее совпадение. Исследований по снижению сопротивления тройников также не много. Можно отметить работу [15], где снижения сопротивления добиваются путем установки перегородки, разделяющей основной и сливающийся с ним потоки. Путем исследования большого количества вариантов положения, наклона, формы и размеров разделяющей перегородки, определен оптимальный вариант, который приводит к снижению КМС от 4% до 62%, причем степень снижения зависит от отношения  $G_B/G_C$ . В работах [16, 17] приведено подробное описание численного и лабораторного эксперимента по изучению влияния на сопротивление профилирующих вставок, устанавливаемых в узле, состоящем из последовательно расположенных отвода и тройника. Для изготовления профилирующих вставок выбраны плавные очертания обтекаемых тел из области самолето- и автомобилестроения. Выбраны оптимальные очертания профилирующих вставок, показано некоторое снижение сопротивления узла, и отмечена его существенная зависимость от отношения  $G_B/G_C$ . В работе [18] также указывается на использование в эксперименте профилирующих вставок и отмечен эффект снижения КМС, но не указаны очертания профилирующих вставок и условия проведения эксперимента.

*Боковые вытяжные отверстия воздуховода.* В среднем вытяжном отверстии течение можно считать аналогичным по сути течению в тройниках на слияние. Здесь также имеют место поток, проходящий мимо отверстия по магистральному направлению, и поток, вливающийся в него из отверстия. Аналогично происходят соударение и смешение потоков, но в этом случае втекание осуществляется из неограниченного пространства. В работе [19] проведено экспериментальное определение сопротивления при проходе потока мимо среднего вытяжного бокового отверстия. Показано хорошее совпадение с результатами эксперимента [20], в котором исследуется сопротивление тройников с разным соотношением размеров бокового ответвления и магистрального воздуховода. Отметим, что в справочнике [1] указано отсутствие у таких тройников зависимости сопротивления на проход от размеров присоединяемого бокового ответвления.

При втекании в концевое боковое вытяжное отверстие прослеживается определенная аналогия с

втеканием в торцевые отверстия, однако втекание происходит сложнее. Имеется несколько экспериментальных работ по определению сопротивления таких отверстий. В работе [21] проведен подробный эксперимент на круглой трубе и определены зависимости КМС бокового вытяжного концевое отверстия от его относительных размеров и расстояния от отверстия до заглушки (тупика).

Сведений по исследованиям отрывных зон, возникающих при входе потока в боковые средние и концевые вытяжные отверстия, в доступных ознакомлению источниках не найдено.

*Торцевые вытяжные отверстия – раструбы-зонты.* Исследованиями подтекания воздуха к таким устройствам занимаются достаточно давно. Имеется большое количество публикаций по определению полей скоростей при подтекании к ним [22 - 28], для чего используются аналитические способы расчета – методы конформных отображений (МКО), дискретных вихрей (МДВ) и др., экспериментальные способы [29, 30], и в последние десятилетия – численные исследования [31, 32]. Список исследований течения к стокам приведенными работами не исчерпывается, но их можно рассматривать как базисные при выборе источника информации для валидации численного решения для указанной конфигурации. Работ по исследованию с учетом возникновения отрывных зон несколько меньше. Здесь можно отметить работы, где в отрывной постановке задача решалась аналитически на основании методов МКО [33] и МДВ [34], и с использованием численных методов [35]. В последней работе исследовалось подтекание к реальному вытяжному шкафу и были рассчитаны формы отрывных зон при срыве потока со створки дверцы. Было проведено усовершенствование входной кромки, приводящее к уменьшению вихревой зоны, и как следствие – к устранению возможности вырывания загрязнений из шкафа. При этом отмечается и некоторое снижение сопротивления вытяжного шкафа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методом вычислительной гидродинамики с использованием программного комплекса Fluent (пакет ANSYS® Academic Research Mechanical and CFD, Release 18.2) проводится исследование течения в следующих фасонных элементах систем вентиляции: в тройнике, в боковых вытяжных отверстиях и вытяжных отсосах-раструбах. Задача решается в двумерной турбулентной постановке. Для замыкания уравнений движения, осредненных по Рейнольдсу, используются модели турбулентности, выбранные в результате валидации с подробным сопоставлением результатов численных решений исследованных фасонных элементов с известными данными по сопротивлению, и, по возможности, с очертаниями вихревых зон. В соответствии с результатами

многих исследований авторов, наиболее корректное решение для течений в тройнике и каналах с последним и средним боковым отверстием дает сочетание модели турбулентности  $k-\epsilon$  «стандартная» со стандартными пристеночными функциями или с расширенным пристеночным моделированием [36, 37], а для задачи с отсосом-раструбом – сочетание модели рейнольдсовых напряжений с расширенным пристеночным моделированием [38].

В качестве граничных условий (ГУ) для стенок каналов ставится условие непроницаемости и непроскальзывания «wall», для вытяжных границ – ГУ с равномерным распределением скорости «velocity inlet», значение которой устанавливается таким образом, чтобы течение было развитым турбулентным ( $Re \gg 10000$ ), для свободных проницаемых или удаленных границ ставится ГУ – «pressure inlet» с избыточным давлением, равным нулю.

Решение каждой задачи исследовалось на «сеточную зависимость», что заключалось в пошаговом измельчении (адаптации) расчетной сетки с проведением решения на каждом этапе адаптации. При этом на каждом этапе определялось искомое значение КМС и строился график его изменения в зависимости от величины  $y^*$  (или  $y^+$ , в зависимости от используемого пристеночного моделирования), которая характеризует степень разрешенности расчетной сеткой пограничного слоя. Решение считалось не зависящим от размера расчетной сетки (окончательным), если на двух последовательных адаптациях значение КМС отличалось на величину от 1 до 5% в зависимости от задачи. Далее с использованием такого окончательного варианта сетки определялись очертания вихревых зон. За очертание вихревой зоны принималась свободная линия тока – крайняя линия тока, огибающая вихревую зону. Нужно отметить, что для задач со смешением потоков окончательный вариант сетки далее использовался для получения результатов во всем диапазоне изменения отношения  $G_b/G_c$ . При этом на входных свободных границах устанавливалось разное сочетание давлений, отличных от нуля.

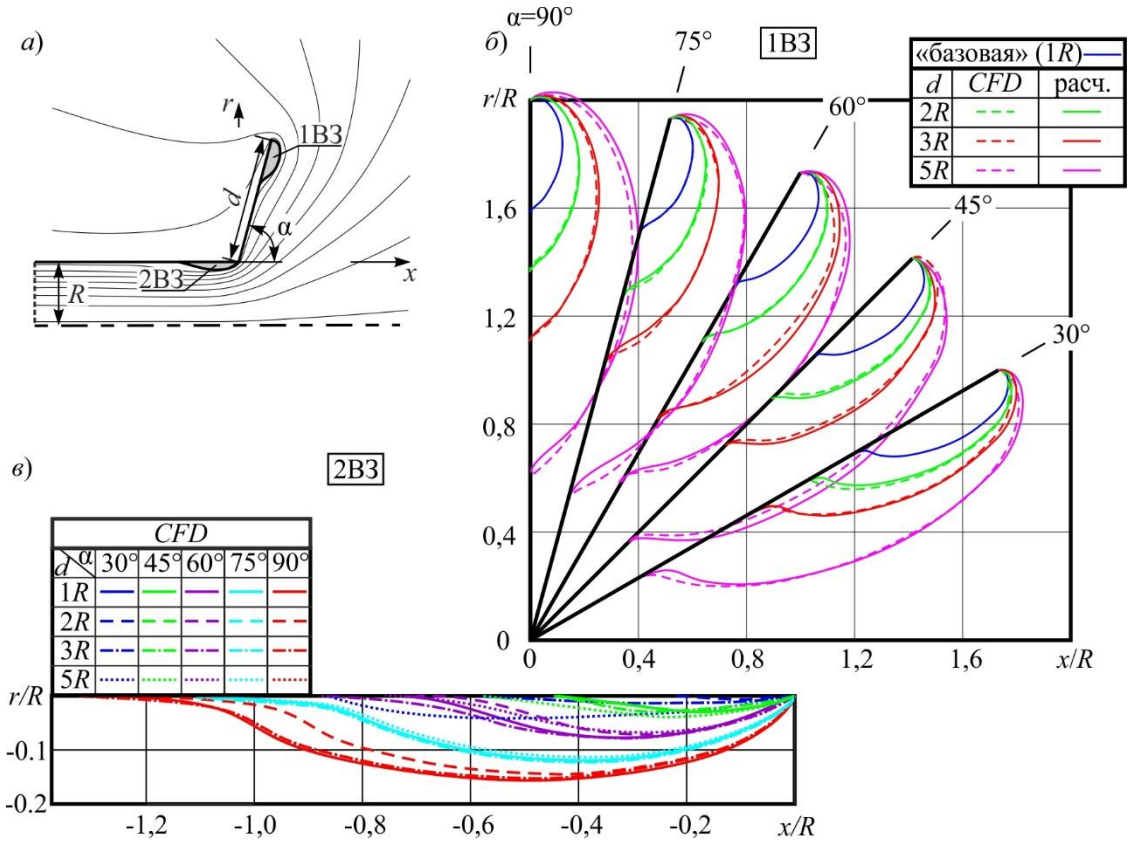
Очертания вихревых зон для боковых среднего и последнего отверстий, кроме численного способа, определялись также на экспериментальной установке, где для визуализации вихревой зоны использовался пар глицерина, который генерировался при помощи устройства для туманообразования, состоящего из нагретой вольфрамовой спирали с диаметром витков около 5мм, и установленного внутри них ватного валика, смачиваемого глицерином. Такой способ позволяет получить достаточно компактный след пара, визуализирующий начальную часть очертания вихревой зоны. Схема установки и методика эксперимента подробно описаны в [39].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ**

В результате численных и экспериментальных исследований определены очертания ВЗ в зависимости от геометрических параметров (размеров отверстий, углов наклона полки зонтраструбы) для фасонных элементов без слияния потоков, и в зависимости от соотношения расходов

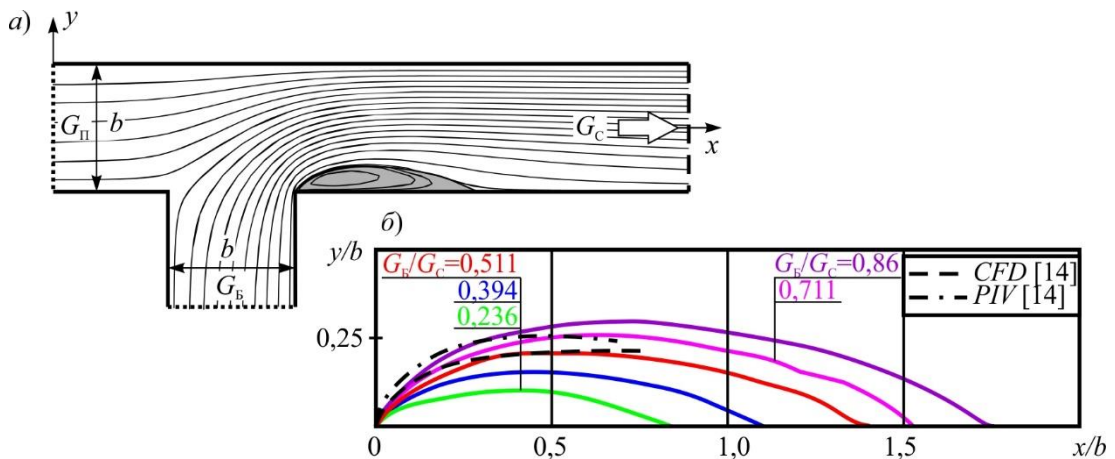
$G_B/G_C$  для элементов со слиянием потоков (см. таблицу).

Для сравнения на рис. 1 и 2 приведены очертания ВЗ в круглом зонте-раструбе и в вытяжном тройнике. Подробнее с результатами исследования авторов по данным фасонным элементам можно ознакомиться в работах [36, 40, 41].



**Рис. 1.** Очертания ВЗ для круглого зонте-раструбы [40]: а) схема течения; б) очертания первой ВЗ; в) очертания второй ВЗ

**Fig. 1.** The contours of the vortex zones for a round exhaust hood [40]: a) flow pattern; b) the outline of the first vortex zone; c) the outline of the second vortex zone



**Рис. 2.** Очертания ВЗ для тройника [36]: а) схема течения; б) очертания вихревой зоны

**Fig. 2.** The contours of the vortex zones for the tee [36]: a) flow pattern; b) the outlines of the vortex zone

Очертания ВЗ для среднего и последнего отверстия приведены на рисунках 3 и 4, там же показаны результаты их экспериментального определения. Сравнение результатов численного и экспериментального определения ВЗ показало

хорошее совпадение для среднего отверстия и удовлетворительное для последнего, что позволяет считать результаты проведенного компьютерного моделирования фасонных элементов воздуховодных сетей адекватными.

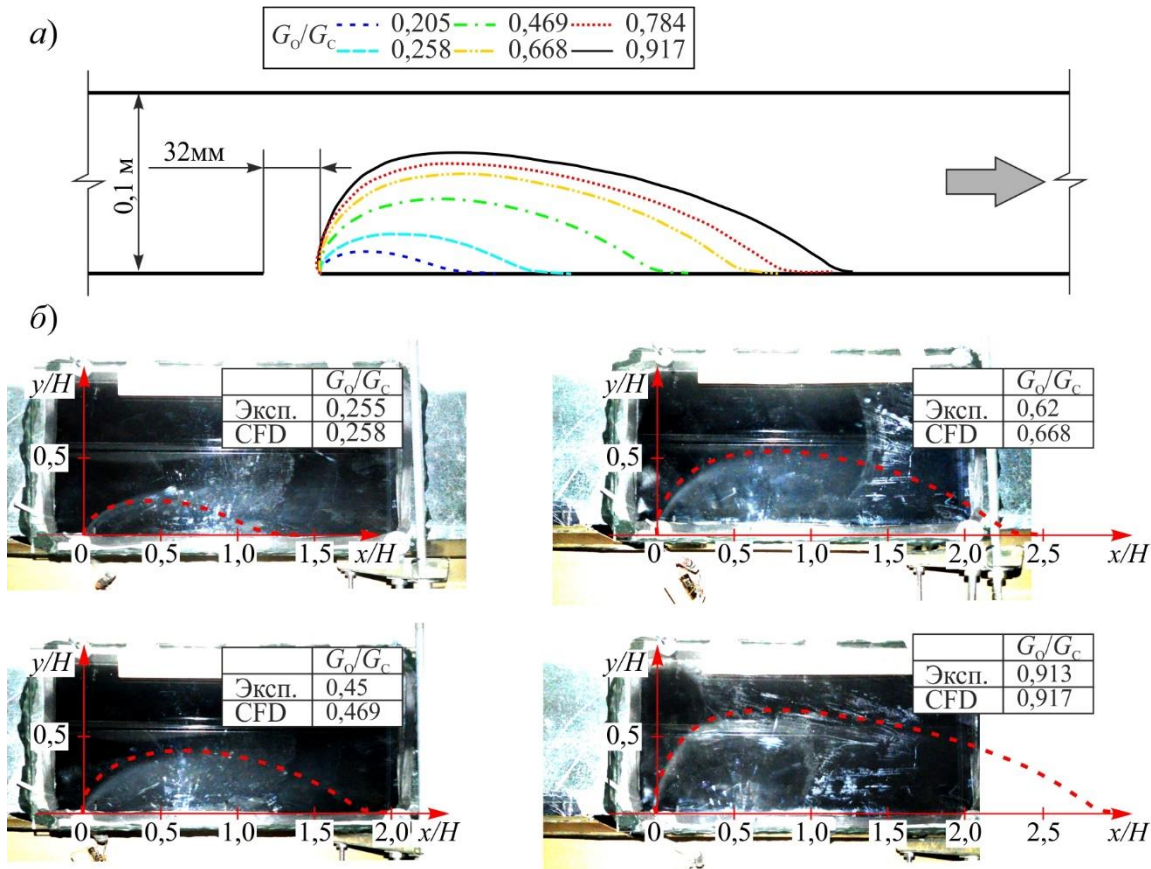


Рис. 3. Очертания вихревых зон для среднего бокового отверстия: а) полученные численно для  $G_o/G_c = 0,2 \div 0,9$ ; б) сравнение с экспериментом

Fig. 3. Outline of vortex zones for the middle side orifice: a) numerically for  $G_o/G_c = 0,2 \div 0,9$ ; b) comparison with experiment

Результаты проведенных исследований позволили выявить ряд обобщенных характеристик очертаний вихревых зон потоков в фасонных элементах различной конфигурации. В работе [40] было показано, что очертания ВЗ, возникающие в отсосе-раструбе, подобны между собой и зависят от геометрии. Подобие очертаний ВЗ выражается в том, что можно использовать одно из очертаний в качестве «базового» («универсального»), а все остальные получить путем масштабирования с использованием коэффициента, величина которого может быть найдена в зависимости от геометрии данного фасонного элемента – длины полки раструбы и его наклона. Таким образом, очертание ВЗ для любой геометрии можно получить путем умножения координат некоторого «базового» («универсального») профиля на масштабный

коэффициент  $k_{ВЗ}$ , зависящий от геометрических параметров элемента. При исследовании течения в среднем отверстии получены данные для одного размера отверстия при разных соотношениях расходов, и в этом случае очертания ВЗ не подобны. В случае течения в боковом последнем отверстии подобие очертаний ВЗ наблюдается для всех размеров отверстий, за исключением лишь самого маленького из исследованных -  $h/H = 0,2$ . На рис. 4 показаны очертания ВЗ, найденные из численных исследований течения (пунктирная линия) и полученные путем умножения координат очертания «базового» профиля (при  $h/H = 1,875$ ) на масштабный коэффициент  $k_{ВЗ}$  (сплошная линия), зависимость которого от  $h/H$  описывается формулой:

$$k_{ВЗ} = 1,3695 \cdot h/H^{-0,468} \quad (1)$$

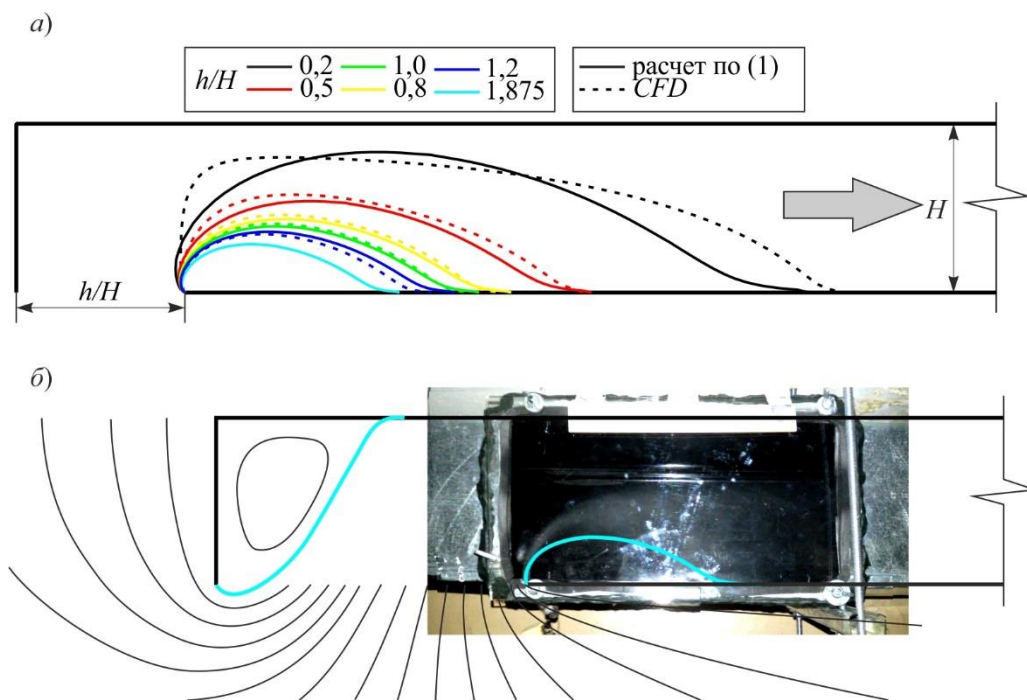


Рис. 4. Очертания ВЗ для последнего бокового отверстия: а) получено численно, сравнение по CFD и по формуле (1); б) сравнение с экспериментом для  $h/H = 1,875$

Fig. 4. The outlines of vortex zones for the last side orifice: a) numerically, the comparison by CFD and formula (1); b) comparison with experiment for  $h/H = 1.875$

Видно достаточно хорошее соответствие очертаний ВЗ, полученных численно и посредством масштабирования. Это позволяет использовать зависимость (1) для практических расчетов очертаний ВЗ при профилировании последних боковых отверстий любого размера в диапазоне  $0,2 < h/H < 2$ .

Профилирование фасонных элементов по очертаниям вихревых зон приводит к снижению КМС. Путем численного моделирования исследовано течение в отсосе-раструбе [38, 40] и зафиксировано образование двух вихревых зон, первой – при срыве потока с входной кромки полки раструба и второй – при срыве потока с острой кромки в месте присоединения полки раструба к воздуховоду (рис. 1). Отмечается, что снижение сопротивления при профилировании по обеим вихревым зонам существенно зависит от угла наклона полки раструба, но практически не зависит от его длины; там же приведена графическая зависимость для определения КМС профилированного отсоса. Зависимость эффекта от профилирования объясняется изменением размеров и формы ВЗ при изменении геометрии раструба – для отсосов с большим углом раскрытия от  $90^\circ$  до  $60^\circ$  на снижение КМС влияет только вторая вихревая зона, которая в этом интервале углов изменяется мало. При уменьшении угла раскрытия от  $60^\circ$  до  $30^\circ$  вторая вихревая зона уменьшается и практически исчезает, поэтому эффект от профилирования также снижается. Но начиная с угла раскрытия  $15^\circ$  и до  $0^\circ$  первая вихревая зона сливается со второй и уже имеет существенные размеры, вследствие чего эффект от

профилирования вновь увеличивается до значений несколько более высоких, чем для раструба в  $90^\circ$ .

Для вытяжного бокового последнего отверстия было проведено моделирование геометрии с профилированием входной острой кромки на основе ранее найденных очертаний (рис. 4а), при этом для отверстия с относительным размером  $h/H = 0,2$  был взят профиль, полученный с использованием масштабного коэффициента. Результаты определения КМС приведены на рис. 5, на котором для сравнения также нанесены линия изменения КМС для непрофилированного элемента, найденная численно, и данные [21] для отверстия в боковой стенке круглого воздуховода. Видно некоторое расхождение для  $h/H > 1$ , причем по данным [21] в этом диапазоне происходит качественное изменение течения, когда внутри круглой трубы возникают два симметричных вихря, обтекающих поток воздуха, входящий в трубу, что приводит к повышенному сопротивлению входа. При дальнейшем увеличении отверстия эти два вихря исчезают, и втекание становится более плавным. Для рассматриваемого при численном моделировании двумерного случая такой особенности не наблюдается и КМС возрастает плавно, но порядок значений, а также общая тенденция хорошо согласуется с экспериментом [21]. Кроме этого, на рис. 5 показаны результаты эксперимента, проведенного нами для отверстия размером  $h/H = 1,875$  с непрофилированным вариантом конструкции и с установкой профилирующей вставки. Расхождение значений находится в пределах экспериментальных погрешностей и не превышает 22%. Сплошными линиями для непрофилированной (2) и

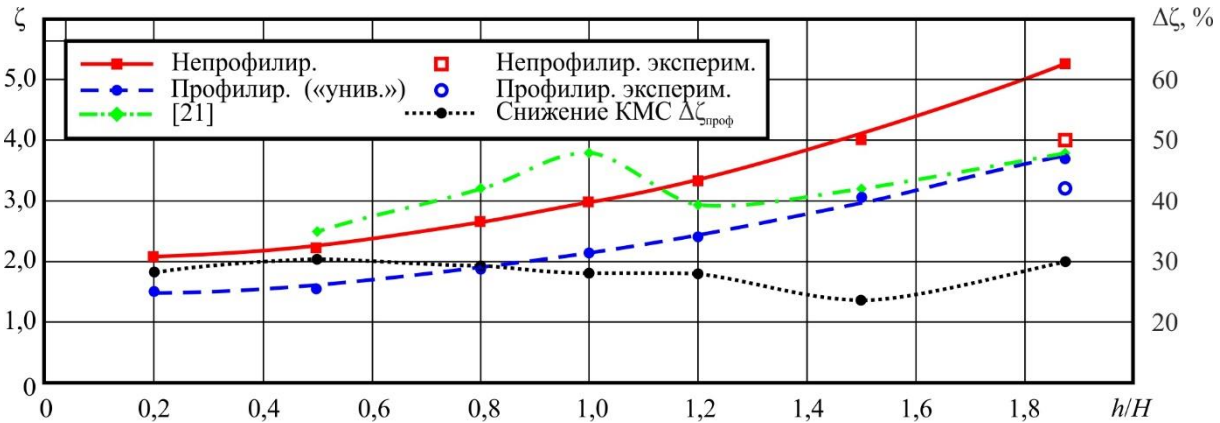
профилированной конструкции (3) отверстий показаны результаты аппроксимации зависимостей для КМС по следующим уравнениям:

$$\zeta_{\text{непроф}} = 0,9179 \cdot h/H^2 - 0,0184 \cdot h/H + 2,0342; \quad (2)$$

$$\zeta_{\text{проф}} = 0,5687 \cdot h/H^2 + 0,1938 \cdot h/H + 1,3745. \quad (3)$$

Также на рис. 5 нанесена линия изменения эффективности профилирования  $\Delta\zeta_{\text{проф}} = 100\% \cdot (\zeta_{\text{непроф}} - \zeta_{\text{проф}}) / \zeta_{\text{непроф}}$ .

Видно, что максимальный эффект (~30%) от профилирования наблюдается для маленьких отверстий и имеющих самые большие вихревые зоны. С увеличением отверстия эффект несколько снижается, хотя и имеет несколько необъяснимый подъем для самого большого из исследованных отверстий  $h/H=1,875$ .

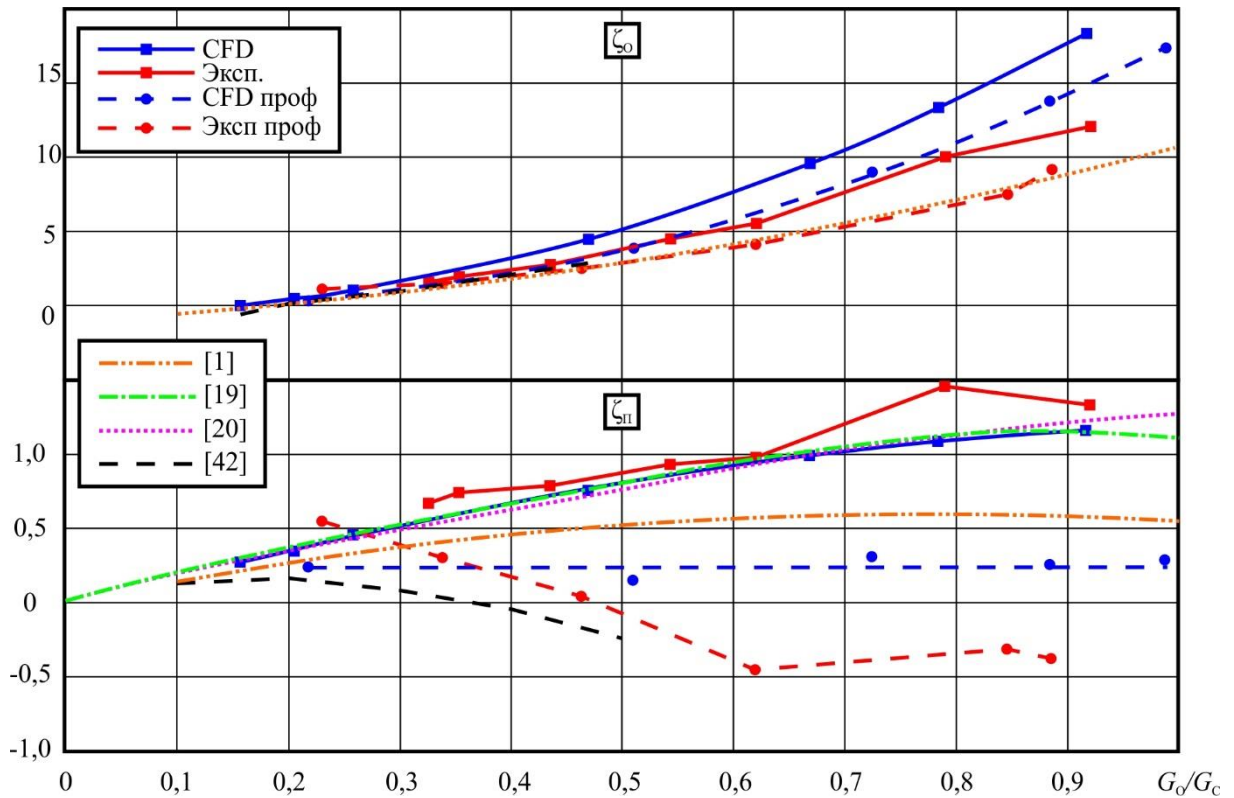


**Рис.5.** Изменение численных и экспериментальных значений КМС по данным авторов для стандартного непрофилированного отверстия и для профилированной конструкции и данные для непрофилированного отверстия [21];  $\Delta\zeta_{\text{проф}}$  – эффективность профилирования.

**Fig.5.** Change in the numerical and experimental values of local drag coefficient according to the authors for a standard non-profiled orifices and for a profiled design and data for an non-profiled orifice according to [21];  $\Delta\zeta_{\text{проф}}$  – profiling efficiency.

Результаты исследований позволили установить особенность течений в тройниках, которая заключается необходимости выбора оптимального очертания для последующего профилирования вследствие существенной зависимости очертаний ВЗ от соотношения расходов  $G_B/G_C$ . В работе [36] авторами было проведено исследование 5 профилей, соответствующих отношениям расходов  $G_B/G_C$  0,236; 0,394; 0,511; 0,711; 0,86. Из них был выбран оптимальный профиль, полученный при  $G_B/G_C = 0,511$ , который показал минимальное сопротивление на всем диапазоне изменения  $G_B/G_C$  для КМС как на проход, так и на боковом ответвлении. Считая, что течение в среднем вытяжном отверстии имеет свойства, аналогичные течению в тройнике, и оптимальным является профиль по очертаниям, найденным по соотношению, близкому к 0,5 была смоделирована конструкция отверстия, спрофилированная по очертаниям ВЗ при соотношении, наиболее близком к 0,5, а именно при  $G_O/G_C \approx 0,469$ . В результате получено существенное (от 30% до 70%) снижение КМС на всем диапазоне  $G_O/G_C$ . При экспериментальной проверке численных результатов также получено снижение КМС, причем даже несколько большее, чем в численной модели, что можно объяснить погрешностями измерения при проведении эксперимента. Результаты расчета и экспериментального исследования представлены на рис. 6, там же показаны и данные [1, 19, 20, 42] для

непрофилированного отверстия. Можно видеть, что экспериментальные и численные результаты очень хорошо согласуются между собой: расхождение в основном не превышает 12%, за исключением соотношения  $G_O/G_C=0,92$ , при котором расхождение составило 30%. Для непрофилированного отверстия можно видеть хорошее согласование с данными [42] для  $\zeta_o$ , и с данными [19, 20] для  $\zeta_p$ , хотя при этом значения  $\zeta_p$  не согласуются с данными [42] ни количественно, ни качественно. Также на рисунке для сравнения нанесены линии зависимостей  $\zeta_p$  и  $\zeta_B$  вытяжного тройника по данным [1]. Видно, что характер изменения зависимости КМС от соотношения  $G_O/G_C$  в тройнике и среднем отверстии одинаковый, но значения КМС существенно различаются. Это может объясняться разными условиями входа потока в магистральный канал. Вместе с тем нужно отметить, что экспериментальные значения  $\zeta_p$  для тройника из работы [20] хорошо совпадают с соответствующими результатами для среднего отверстия. Для профилированного отверстия результаты численного расчета и эксперимента по  $\zeta_o$  совпадают очень хорошо, а по  $\zeta_p$  – несколько хуже: экспериментальные значения в диапазоне  $G_O/G_C > 0,4$  становятся отрицательными, хотя в численной модели этого не наблюдается. Это объясняется, тем, что значения КМС в этом случае близки к нулю и при экспериментальной проверке соизмеримы с погрешностями измерений.



**Рис. 6.** Зависимости  $\zeta_{\pi}$  и  $\zeta_0$  от  $G_0/G_C$ , найденные численно и экспериментально для стандартной и профилированной конструкции среднего бокового отверстия; данные [1, 19, 20, 42]

**Fig. 6.** The dependence of  $\zeta_s$  and  $\zeta_o$  on  $G_o/G_s$ , found numerically and experimentally for the standard and profiled design of the middle side orifice; data [1, 19, 20, 42]

Изменение КМС в диапазоне  $0,2 < G_0/G_C < 0,9$  хорошо описывается для непрофилированного отверстия выражениями

$$\zeta_{\pi} = -0,9128 G_0/G_C^2 + 2,1585 G_0/G_C - 0,0481 \quad (4)$$

$$\zeta_0 = 21,59 G_0/G_C^2 + 0,9244 G_0/G_C - 0,6842 \quad (5)$$

а для профилированного отверстия – выражениями

$$\zeta_{\pi} = 0,2366 \quad (6)$$

$$\zeta_0 = 21,091 G_0/G_C^2 - 3,0965 G_0/G_C + 0,0172 \quad (7)$$

Результаты расчетов по выражениям (4) и (5) показаны на рис. 6 линиями с обозначением «CFD», а по выражениям (6) и (7) – линиями с обозначением «CFD проф». Процент снижения для  $\zeta_0$  на всем диапазоне примерно одинаков и составляет 27%, а для  $\zeta_{\pi}$  увеличивается от 31 до 79% при увеличении  $G_0/G_C$  от 0,2 до 0,9.

### ВЫВОДЫ

Проведенными численными и натурными исследованиями установлено, что профилирование фасонных деталей по очертаниям вихревых зон, образующихся при срыве потока с острых кромок,

позволяет существенно, до 70%, снижать их КМС и, соответственно, энергозатраты воздухопроводных сетей в целом. Профилирование в отличие от способа скругления острых кромок не увеличивает требуемых габаритов воздухопроводов, и значительно проще технически, чем остальные способы снижения КМС фасонных деталей. Очертания вихревых зон определяются на основе численного эксперимента с использованием методов вычислительной гидродинамики, или в натурных испытаниях. Работами авторов выявлено, что для ряда фасонных деталей имеет место геометрическое подобие очертаний, что позволяет с достаточной точностью масштабировать результаты и радикально сократить объем экспериментов. Определены зависимости для нахождения масштабных коэффициентов, по которым несложно рассчитать очертания вихревых зон в требуемых диапазонах изменения типоразмеров фасонных деталей при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Построены графические зависимости для определения КМС энергоэффективных фасонных деталей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение процессов возникновения и устранения вторичных вихревых зон, иногда образующихся в профилированных конструкциях фасонных элементов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Зиганшин А.М., Алещенко И.С., Зиганшин М.Г. и др. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками: пат. 2604264 Российская Федерация. 2016. Бюл. № 34.
3. Duct fitting database. Режим доступа: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/duct-fitting-database> (дата обращения 30.07.2019).
4. ПО REVIT для проектирования инженерных систем. Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/revit/mep> (дата обращения 30.07.2019).
5. Левин С.Р. Сопротивление тройников вытяжных воздуховодов // Отопление и вентиляция. 1940. № 10 - 11. С. 5 - 10.
6. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. Учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1979. 295с.
7. Bassett M.D., Winterbone D.E., Pearson R.J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 2001. Vol. 215, № 8. PP. 861-881.
8. Kinne E. Beiträge zur Kenntnis der hydraulischen Verluste in Abzweigstücken // Hyd. Inst., Tech. Hochschule München. 1931. № 4. PP. 70-93.
9. McNown J.S. Mechanics of Manifold Flow // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1954. Vol. 119. PP. 1103-1142.
10. Sangster W.M. et al. Pressure changes at storm drain junctions // Eng. Exp. Station. Univ. Missouri. 1958. Vol. 41, № 41. P. 55.
11. Naramoto I., Kasai T. On the loss of energy at impact of two confined streams of water // Kyushu Imperial University College of Engineering Memoirs 1931. Vol. 6, № 3. PP. 189-261.
12. Gardel A. Les pertes de charge dans les écoulements au travers de branchements en té // Bull. Tech. la Suisse Rom. 1957. Vol. 83. PP. 143-148.
13. Hirota M. et al. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc., 2010. Vol. 31, № 5. PP. 776-784.
14. Štigler J. et al. The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and PIV Measurement // Procedia Eng. 2012. Vol. 39. PP. 19-27.
15. Gao R. et al. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // Build. Environ. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 132. PP. 345-356.
16. Li A. et al. Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Build. Simul. 2014. Vol. 7, № 2. PP. 175-184.
17. Li A., Chen X., Chen L. Numerical investigations on effects of seven drag reduction components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Build. Serv. Eng. Res. Technol. 2015. Vol. 36, № 3. PP. 295-310.
18. Кононов А.В. Аэродинамическое усовершенствование элементов сети воздуховодов // Информационный бюллетень «Теплоэнергоэффективные технологии». 2001. № 3. С. 56-57.
19. Saito Y., Ikohagi T. Dividing and Combining Flows through Orifice Set on Side Wall of Square Duct. // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 1994. Vol. 60, № 574. PP. 1959-1964.
20. Maeda T., Isiguro I., Nakamura Y. Loss of Pressure due to Confluent Flow-Fitting (Scientific Basis of Planning Building) // Trans. Archit. Inst. Japan. 1960. Vol. 66.2, № с. PP. 149-152.
21. Ханжонков В.И., Давыденко Н.И. Сопротивление боковых отверстий концевой участка трубопровода // Промышленная аэродинамика. 1959. № 15. С.38-46.
22. R. Braconnier, Bibliographic Review of Velocity Fields in the Vicinity of Local Exhaust Hood Openings, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 49 (1988). PP. 185-198. DOI:10.1080/15298668891379585.
23. F. Cascetta, L. Bellia, Velocity fields in proximity of local exhaust hood openings: an intercomparison between current recommended formulas and experimental studies, Build. Environ. 31 (1996). PP. 451-459. DOI:10.1016/0360-1323(96)00010-8.
24. DallaValle J. Exhaust hoods. How to design for efficient removal of dust, fumes, vapors and gases, with data, formulas and practical examples showing exact procedure. New York: Heating and ventilating, 1944. 49 p.
25. Fletcher B. Effect of flanges on the velocity in front of exhaust ventilation hoods // Ann. Occup. Hyg. 1978. Vol. 21, № 3. PP. 265-269.
26. Прузнер А.С. Структура воздушного потока в зоне действия всасывающих отверстий // Отопление и вентиляция. 1939. №10. С. 13-21.
27. Бромлей М.Ф. Структура потока в зоне действия всасывающих отверстий // Отопление и вентиляция. 1934. №3. С. 2-8.
28. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВOK-ПРЕСС, 2008. 214с.
29. B. Fletcher, Centreline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction, Ann. Occup. Hyg. 20 (1977). PP. 141-146. DOI:10.1093/annhyg/20.2.141.
30. F. Cascetta, Experimental evaluation of the velocity fields for local exhaust hoods with circular and rectangular openings, Build. Environ. 31 (5) (1996). PP. 437-449, DOI: 10.1016/0360-1323(96)00011-X.
31. I. Kulmala, Numerical calculation of air flow fields generated by exhaust openings, Ann. Occup. Hyg. 37 (1993). PP. 451-468. DOI:10.1093/annhyg/37.5.451.
32. J. Chen, Research on the axial velocity change rule of desktop slot exhaust hood, Ind. Health. 56 (2018). PP. 278-284. DOI:10.2486/indhealth.2017-0211.

33. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Сафиуллин Р.Г. О форме отрывных зон на входе в раструб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 3–4. С. 39–47.
34. Логачев К.И., Пузанок А.И., Посохин В.Н. Расчет течений на входе в отсосы - раструбы методом дискретных вихрей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 7–8. С. 61–69.
35. Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method // Chem. Eng. Res. Des. 2018. Vol. 132. PP. 627–643.
36. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6. С. 41–48.
37. Зиганшин А.М., Батрова К.Э., Гимадиева Г.А. Численное определение характеристик течения через последнее боковое отверстие в воздуховоде // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. №7. С. 53–65.
38. Logachev K.I. et al. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods // Energy Build. 2018. Vol. 173. PP. 58–70. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.036.
39. Бадыкова Л.Н., Беляева Е.Э., Гимадиева Г.А. Испытание установки для исследования энергоэффективных вентиляционных фасонных деталей // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. № 4. С. 25–34.
40. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet // Build. Environ. 2019. Vol. 151. PP. 338–347. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.039
41. Ziganshin A.M. et al. Numerical modelling of energy efficient exhaust orifices and hoods in ventilation and air conditioning systems in buildings and facilities of thermal power plants // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 288. PP. 012134. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012133
42. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др.; Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992. 416 с.
1. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim sprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance] Ed. M.O. Shtejnberg. 3rd revised and enlarged ed. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 672 p. (in Russian).
2. Patent RF 2604264. Soedinitel'nyy fasonnyy element s profiliruyushchimi vstavkami [Shaped connecting element with profiling inserts] A.M. Ziganshin, I.S. Aleshchenko, M.G. Ziganshin et al. Published 10.12.16; Bull. No. 34. (in Russian).
3. Duct fitting database. Access mode: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/duct-fitting-database> (date of access 30.07.2019).
4. REVIT software for engineering systems design. Access mode: <https://www.autodesk.ru/products/revit/mep> (date of access 30.07.2019).
5. Levin S.R. Resistance of exhaust air duct tees. Otoplenie i ventiljacija. 1940. № 10 - 11. pp. 5 – 10. (in Russian).
6. Taliev V.N. Ajerodinamika ventiljacji. Uchebnoe posobie dlja vuzov. [Aerodynamics of ventilation. Textbook for universities.]. M.: Strojizdat, 1979. 295p. (in Russian).
7. Bassett M.D., Winterbone D.E., Pearson R.J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 2001. Vol. 215, № 8. PP. 861–881.
8. Kinne E. Beiträge zur Kenntniss der hydraulischen Verluste in Abzweigstücken // Hyd. Inst., Tech. Hochschule München. 1931. № 4. PP. 70–93.
9. McNowen J.S. Mechanics of Manifold Flow // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1954. Vol. 119. PP. 1103–1142.
10. Sangster W.M. et al. Pressure changes at storm drain junctions // Eng. Exp. Station. Univ. Missouri. 1958. Vol. 41, № 41. P. 55.
11. Naramoto I., Kasai T. On the loss of energy at impact of two confined streams of water // Kyushu Imperial University College of Engineering Memoirs 1931. Vol. 6, № 3. PP. 189–261.
12. Gardel A. Les pertes de charge dans les écoulements au travers de branchements en té // Bull. Tech. la Suisse Rom. 1957. Vol. 83. PP. 143–148.
13. Hirota M. et al. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc., 2010. Vol. 31, № 5. PP. 776–784.
14. Štigler J. et al. The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and PIV Measurement // Procedia Eng. 2012. Vol. 39. PP. 19–27.
15. Gao R. et al. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // Build. Environ. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 132. PP. 345–356.
16. Li A. et al. Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Build. Simul. 2014. Vol. 7, № 2. PP. 175–184.
17. Li A., Chen X., Chen L. Numerical investigations on effects of seven drag reduction components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Build. Serv. Eng. Res. Technol. 2015. Vol. 36, № 3. PP. 295–310.
18. Kononov A.V. Aerodynamic improvement of air duct network elements. Informacionnyj bjulleten' «Teplojenergojeffektivnye tehnologii». 2001. № 3. pp. 56–57. (in Russian).
19. Saito Y., Ikohagi T. Dividing and Combining Flows through Orifice Set on Side Wall of Square Duct. // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 1994. Vol. 60,

## REFERENCES

№ 574. PP. 1959–1964.

20. Maeda T., Isiguro I., Nakamura Y. Loss of Pressure due to Confluent Flow-Fitting (Scientific Basis of Planning Building) // Trans. Archit. Inst. Japan. 1960. Vol. 66.2, № c. PP. 149–152.

21. Hanzhonkov V.I., Davydenko N.I. S The resistance of the side orifices of the end section of the pipeline. Promyshlennaja ajerodinamika. 1959. № 15. pp.38-46. (in Russian).

22. R. Braconnier, Bibliographic Review of Velocity Fields in the Vicinity of Local Exhaust Hood Openings, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 49 (1988). PP. 185–198. DOI:10.1080/15298668891379585.

23. F. Cascetta, L. Bellia, Velocity fields in proximity of local exhaust hood openings: an intercomparison between current recommended formulas and experimental studies, Build. Environ. 31 (1996). PP. 451–459. DOI:10.1016/0360-1323(96)00010-8.

24. DallaValle J. Exhaust hoods. How to design for efficient removal of dust, fumes, vapors and gases, with data, formulas and practical examples showing exact procedure. New York: Heating and ventilating, 1944. 49 p.

25. Fletcher B. Effect of flanges on the velocity in front of exhaust ventilation hoods // Ann. Occup. Hyg. 1978. Vol. 21, № 3. PP. 265–269.

26. Pruzner A.S. The structure of the air flow in the zone of exhaust orifices. Otoplenie i ventiljacija. 1939. №10. pp. 13-21. (in Russian).

27. Bromlej M.F. Structure of the flow in the zone of the exhaust orifices. Otoplenie i ventiljacija. 1934. №3. pp. 2-8. (in Russian).

28. Posohin V.N. Aerodinamika ventiljacji [Aerodynamics of ventilation]. M.: AVOK-PRESS, 2008. 214p. (in Russian).

29. B. Fletcher, Centreline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction, Ann. Occup. Hyg. 20 (1977). PP. 141–146. DOI:10.1093/annhyg/20.2.141.

30. F. Cascetta, Experimental evaluation of the velocity fields for local exhaust hoods with circular and rectangular openings, Build. Environ. 31 (5) (1996). PP. 437-449, DOI: 10.1016/0360-1323(96)00011-X.

31. I. Kulmala, Numerical calculation of air flow fields generated by exhaust openings, Ann. Occup. Hyg. 37 (1993). PP. 451–468. DOI:10.1093/annhyg/37.5.451.

32. J. Chen, Research on the axial velocity change rule of desktop slot exhaust hood, Ind. Health. 56 (2018). PP. 278–284. DOI:10.2486/indhealth.2017-0211.

33. Posohin V.N., Salimov N.B., Safiullin R.G. About the form of vortex zones at the entrance of exhaust hood. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2003. № 3–4. pp. 39–47. (in Russian).

34. Logachev K.I., Puzanok A.I., Posohin V.N. Calculation of currents at the entrance to exhaust - sockets with the method of discrete vortices // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2004. № 7–8. pp. 61–69. (in Russian).

35. Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method // Chem. Eng. Res. Des. 2018. Vol. 132. PP. 627–643.

36. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical investigation of flow in profiled ventilation tee at junction. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2017. № 6. pp. 41–48. (in Russian).

37. Ziganshin A.M., Batrova K.E., Gimadieva G.A. Numerical determination of flow characteristics through the last lateral opening in the air duct. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2018. №7. pp. 53–65. (in Russian).

38. Logachev K.I. et al. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods // Energy Build. 2018. Vol. 173. PP. 58–70. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.036.

39. Badykova L.N., Beljaeva E.E., Gimadieva G.A. Test run of laboratory installation for research of energy efficient ventilation duct fittings. Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura. 2017. № 4. pp. 25–34. (in Russian).

40. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet // Build. Environ. 2019. Vol. 151. PP. 338–347. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.039

41. Ziganshin A.M. et al. Numerical modelling of energy efficient exhaust orifices and hoods in ventilation and air conditioning systems in buildings and facilities of thermal power plants // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 288. PP. 012134. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012133

42. Bogoslovskiy V.N. Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroystva. V 3 ch. V60 Ch.Z, Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. Kn. 1 [Internal sanitary equipment. Ch. 3, Ventilation and air conditioning]/ V.N. Bogoslovskiy, A.I. Pirumov, V.N. Posokhin i dr.; Pod red. N.N. Pavlova i Yu.I. Shillera. 4-e izd., pererab. i dop. Moscow, Stroyizdat, 1992. 319 p. (in Russian).

## INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION SYSTEMS BY MEANS OF PROFILING PHASON ELEMENTS

Ziganshin A.M., Batrova K.E., Gimadieva G.A., Logachev K.I., Averkova O.A.

**Summary.** The article discusses the issues of reducing the energy consumption of ventilation systems. A detailed analysis is given and the results of the studies of the flows carried out by the authors in the shaped elements of the air duct networks, in particular, in exhaust hoods, asymmetric exhaust tees, are summarized; also presents the results of numerical and experimental studies of the outlines of the vortex zones formed when the flow is disrupted from the inlet edge of the middle and last side exhaust openings of the air ducts. Numerical studies were performed using the Ansys Fluent software package. Based on the data obtained, numerical modeling was carried out and improved designs of fitting elements profiled according to the outlines of the vortex zones were implemented. The results of numerical studies are verified experimentally. It is shown that for all investigated fittings, the use of profiling leads to a significant decrease in their resistance. A decrease of local drag coefficient by a value of 30% to 60% was obtained depending on the design and operating parameters of the fitting elements. For the sizes of a number of fittings, in particular, the inlet sections of the exhaust side and end openings, a geometric similarity was found to the outlines of the vortex zones of the flows. Graphic and analytical dependencies are obtained for determining the local drag coefficients of energy-efficient fittings and its outlines of the vortex zones. This will allow us to design improved fittings in the design, construction of new and reconstruction of existing duct networks of ventilation and air conditioning systems. The use of profiled fittings will lead to reduction in operating costs due to the saving of electric energy on the fan drive and the reduction of capital investments in the facility due to the possibility of using a ventilation unit of lower power and size.

**Key words:** exhaust ventilation systems, vortex zones, profiling of fittings, reducing energy costs



УДК 697.34

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Чичерин С. В.

Омский государственный университет путей сообщения,  
644046, Россия, г. Омск, пр. Маркса, 35,  
man\_csv@hotmail.com

### Аннотация.

**Предмет исследования:** В условиях рыночной экономики теплоснабжение стало услугой, а задачи обеспечения гидравлических режимов и снижения последствий переходных процессов не самоцелью, а лишь средством на пути обеспечения жителей, административных и коммерческих учреждений тепловой энергией.

**Материалы и методы:** Гидравлические режимы водяных тепловых сетей разрабатываются ежегодно для отопительного периода, для оценки закономерностей использовался программно-расчетный комплекс ZuluThermo. Сравнение распределения давлений выполнено на примере системы централизованного теплоснабжения г. Омска.

**Результаты:** Показаны типичная комплектация теплового пункта вновь строящегося здания и основные принципы выбора насосного оборудования с частотно-регулируемым приводом. Основная причина необеспечения гидравлических режимов и возникновения переходных процессов – недостаточное финансирование, а, как следствие, необходимость занижения параметров на теплоисточнике, чрезмерные тепловые потери и перерасход тепловой энергии абонентами. Анализ расчетных располагаемых напоров и соответствующих величин в контрольных точках теплосети показал отличие на 20-25%. Выявлено, что источниками жалоб чаще всего становятся одни и те же группы конечных потребителей, причем жалобы часто не обоснованы. Показано, почему любая организация, связанная с распределением тепловой энергии, может работать в сфере b2b и b2c.

**Выводы:** Ориентация генерирующего и теплосетевого бизнеса на b2b или b2c модели крайне перспективна. Для обеспечения заданного гидравлического режима важно достичь потребления тепловой энергии в пропорциональном соответствии с расчетными тепловыми нагрузками. Информация об их величинах хранится в базах данных, используемых для расчета потокораспределения и начисления оплаты. Перспектива применения блокчейна в сфере теплоснабжения связана прежде всего с защитой таких баз данных и невозможности фальсификации записей в них. При достижении значительной доли элементов управления тепловыми сетями, оснащенных средствами телемеханизации, целесообразным становится использования блокчейна для защиты таких элементов от несанкционированного воздействия извне.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, насос, режим, давление, тепловая сеть, вода.

### ВВЕДЕНИЕ

Апрель 2019 года отметился сразу чередой резонансных событий, связанных с системами централизованного теплоснабжения. 08 апреля в г. Санкт-Петербурге из-за повреждения участка тепловой сети и выброса горячей воды от термических ожогов погибла женщина, находившаяся в квартире на первом этаже в многоквартирном доме на 2-й Комсомольской улице. В результате коммунальной аварии также пострадал 30-летний сын погибшей. 24 апреля и также в г. Санкт-Петербурге рейсовый автобус попал в яму с горячей водой, образовавшуюся в результате размыва грунта вблизи места повреждения подающего трубопровода тепловой

сети. Кроме очевидного социального и экономического вреда каждое такое происшествие может быть классифицировано как технологическое нарушение, требующее оповещения отключаемых и смежных абонентов и проведения оперативных переключений, с последствиями в виде дестабилизации гидравлического режима и возникновения множества неблагоприятных для систем централизованного теплоснабжения переходных процессов. На протяжённых тепловых сетях, имеющих выраженные резервные связи, переключения, как правило, не ограничиваются лишь локализацией поврежденного участка путем закрытия секционирующей арматуры и последующего его заполнения, а включают в себя организацию временной схемы теплоснабжения,

затрагивающей теплоисточник, насосные станции и несколько сотен потребителей. Каждое такое переключение требует колоссального внимания со стороны персонала оперативно-диспетчерских служб, машинистов насосных станций, начальников смен станций, приводит к изменению расходов сетевой воды, подпитки, а значит, загрузке или разгрузке водоподготовительного оборудования, а при несогласованном выполнении оно может привести к чрезмерному снижению давления или гидравлическому удару. Все это подчёркивает актуальность поставленной в настоящей работе цели, а именно: выявить предпосылки развития гидравлической разрегулировки и предложить пути решения проблемы. Для достижения цели сформулированы следующие задачи: провести ситуационное исследование на примере системы централизованного теплоснабжения крупного населенного пункта, проанализировать типичную комплектацию теплового пункта вновь строящегося здания, предложить способы внедрения современных IT-технологий для обеспечения заданного гидравлического режима, задать направления для дальнейших изысканий в данной сфере научной деятельности.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Согласно п. 4.12.36 Правил технической эксплуатации<sup>1</sup> в основу режима отпуска тепла для водяных систем теплоснабжения должен быть положен график центрального качественного регулирования, а, значит, количественное регулирование (регулирование расходом) является исключением. Для насосных установок в условиях практического отсутствия экономичных способов регулирования расхода теплоносителя, а значит и режима их работы одно лишь повышение КПД еще не обеспечивает возможной экономии электроэнергии. В связи с этим параллельно с работами по повышению заводских КПД насосов в системах централизованного теплоснабжения осуществляются мероприятия по улучшению режимов их использования как на тепловом пункте [1], так и на теплоисточнике [2]. Достижение синергичной работы удаленных элементов невозможно без внедрения комплексной системы телемеханизации, диспетчеризации и автоматизации.

В настоящее время полностью автоматизированные системы централизованного теплоснабжения еще не функционируют ни в одном городе нашей страны [3]. Однако решение оптимизационных задач из числа связанных с теплоснабжением осуществляется в нескольких городах [4]. В частности, решена задача распределения нагрузки между котлами котельной [5].

Для расчета гидравлических режимов применяются различные математические модели, часть из них имеют проблемы со сходимостью и получением начальных приближений [6, 7], другая часть не позволяют решать техническую задачу потокораспределения, делая акцент на ценообразовании [8] или анализе рыночных аспектов генерирующего и теплосетевого бизнеса [9]. Как показано ниже, на гидравлическую устойчивость системы централизованного теплоснабжения непосредственное влияние оказывает величина тепловых потерь, в свою очередь зависящая от множества факторов, в т. ч. способа застройки [10].

При проведении литературного обзора намеренно обходились вниманием работы, касающиеся сравнения различных программно-расчетных комплексов [11] или выявления перспективных направлений их развития [12].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Понятие «b2c» происходит от английского «business to consumer» (дословно – «бизнес для потребителя»), что означает термин продажи товара и услуг физическим лицам. Такая модель работы предполагает, что клиент покупает что-то для себя, для своего личного пользования. Соответственно b2b – это «business to business» («бизнес для бизнеса»): компании, такого профиля продают товары и услуги для других компаний. В мире b2b-продаж товары и услуги покупаются не для того, чтобы пользоваться самим, а потому что это им нужно для работы их собственного бизнеса.

Термин «блокчейн» (от англ. Block Chain) стало активно обсуждаться с ростом популярности криптовалюты для защиты баз данных.

Система блокчейн имеет следующие характерные черты:

создается первичный блок, в котором не имеется записи о предыдущем блоке;

каждый очередной блок содержит информацию о «родителе», виде транзакции, собственном заголовке, используемом при генерации дочернего блока;

пользователи системы видят все количество блоков, но обладают доступом лишь к своим.

Криптовалютами область применения технологии не ограничиваются. Большой интерес распределенная система хранения данных представляет для банковских учреждений, государственных и ресурсоснабжающих организаций.

С формальной точки зрения средствами задания гидравлического режима являются: насосное оборудование на тепловых пунктах потребителей, насосных станциях и на теплоисточнике, схема

<sup>1</sup> СО 153-34.20.501-2003 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации

теплоприготовительной установки источника и гидравлическое сопротивление трубопроводов, зависящее в основном от линейного падения давления на участке, определяемого в свою очередь по уравнению Дарси для турбулентного режима [13]:

$$R_{\lambda} = \frac{\lambda w^2 \rho}{2d} = 0.812 \lambda \frac{G^2}{d^5 \rho} \quad (1)$$

Определение коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  во всех расчетных комплексах, как правило, производится по формуле Б. Л. Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_{\Sigma}}{d} \right)^{0,25} \quad (2)$$

При подстановке шероховатости следует различать эквивалентную  $k_{\Sigma}$ , относительную  $k_{\Sigma}/d$  и абсолютную  $k_{\Sigma}$  величины:

$$k_{\Sigma} = k_{\text{омн}} = \frac{k_{\text{абс}}}{r} \quad (3)$$

Именно величина эквивалентной шероховатости внутренней поверхности стальных труб задается п. 8.5 СП 124.13330.2012 «Тепловые сети»:

- для паровых тепловых сетей  $k_{\Sigma} = 0,0002$  м;
- для водяных тепловых сетей  $k_{\Sigma} = 0,0005$  м;
- для сетей горячего водоснабжения  $k_{\Sigma} = 0,001$  м.

Переходные процессы в гидравлических системах, как правило, описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial l} = i_f + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial \tau} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial l} \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} - v \frac{\partial H}{\partial l} = \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial l} \end{cases} \quad (4)$$

где  $H = z + p/(\rho g)$  – пьезометрический напор;  
 $v$  – средняя скорость;  
 $l$  – координата, отсчитываемая вдоль оси трубы;  
 $a$  – скорость распространения ударной волны в жидкости;

$i_f$  – уклон трения (удельная потеря энергии на трение в трубопроводе).

Делая ряд допущений, система может быть приведена к двум волновым уравнениям, общие решения которых записываются следующим образом:

$$\begin{cases} H - H_0 = f\left(t - \frac{l}{a}\right) + \varphi\left(t + \frac{l}{a}\right) \\ v - v_0 = \frac{g}{a} \left[ f\left(t - \frac{l}{a}\right) - \varphi\left(t + \frac{l}{a}\right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

где  $H_0$  и  $v_0$  – соответственно пьезометрический напор и скорость в трубе при установившемся движении;

$f$  и  $\varphi$  – произвольные функции;

$a$  – скорость распространения в трубе волны изменения давления, определяемая по формуле Жуковского.

Что касается скорости процессов в теплообменной аппаратуре подогревателей горячего водоснабжения, вентиляции, независимо присоединенных систем отопления, пароводяных теплофикационных подогревателей ТЭЦ и водоводяных подогревателей котельных, то гидравлические и тепловые процессы в них происходят значительно быстрее, поэтому динамикой этих процессов также можно пренебречь.

Различная удаленность потребителей от источников теплоты не позволяет наилучшим образом использовать выработанную теплоту без применения средств автоматики. Время транспортировки теплоносителя от источника до конечного потребителя в крупных системах централизованного теплоснабжения с неравномерной загрузкой сети составляет 15–20 ч и увеличивается при снижении расхода. Тепловые потери в трубопроводах тепловой сети, которые обуславливают падение температуры теплоносителя по длине сети, могут составить 15–20С [14]. Более подробному исследованию и разработке методов расчета нестационарных тепловых режимов элементов систем централизованного теплоснабжения посвящены работы [15, 16].

При экспериментальных исследованиях переходных гидравлических процессов в действующих тепловых сетях и на экспериментальных стендах используется информационно-измерительный комплекс, включающий малоинерционные датчики параметров, регистрирующие приборы, синхронизацию записи параметров.

По принципу действия и назначению системы защиты от недопустимых давлений могут быть разделены на системы защит от гидравлических ударов и от недопустимых давлений при квазистационарных режимах. Данная классификация до некоторой степени условна. Известны такие устройства, которые своим действием, защищая от гидравлических ударов, изменяют и конечный стационарный режим, например, сбросные устройства. Тем не менее требования к сбросным устройствам – быстроедействие, пропускная способность и т.д. – могут существенно изменяться в зависимости от назначения клапана. Отличительной особенностью противоударных устройств является их быстроедействие, которое может оказаться не более 0,1–0,3 с. Каждое защитное устройство имеет ограниченную зону применения, выбор типа устройства осуществляется расчетным путем.

Для защиты оборудования тепловых сетей осуществляется установка быстродействующих сбросных клапанов диаметрами до 300 мм. Рабочий диапазон давлений этих клапанов составляет 0,2–1,0 МПа. Время полного открытия клапана в

зависимости от давления настройки равно 0,3–0,5 с, что определяет время, за которое происходит возрастание давления от давления настройки до максимально допустимого значения.

Экспериментальными и расчетными исследованиями установлено, что градиент давления при переходных процессах может достигать 0,3-0,4 МПа/с, а время, за которое давление возрастает до максимального значения, может быть 0,1-0,3 с. Если при этом давление в нормальном гидравлическом режиме превышает 0,25 МПа, возможно применение защитного устройства, включающего в себя нормально открытый регулирующий клапан и две последовательно установленные разрывные мембраны. Время разрыва мембраны составляет около 0,05 с. В нашей стране налажен выпуск выпуклых разрывных мембран диаметрами до 300 мм.

Наиболее простым сбросным устройством, применение которого возможно при исходном давлении меньше 0,25 МПа, является гидрозатвор. Помимо указанных устройств ограниченную область применения нашли пневматические резервуары, маховые колеса на оси насосных агрегатов.

Одним из мероприятий по улучшению режимов использования насосного оборудования является обеспечение соответствия между напорной характеристикой насосов и сопротивлением трубопроводов с тем, чтобы исключить избыточный напор, вызывающий в связи с дросселированием воды значительные перерасходы электроэнергии. Например, на Среднеуральской ГРЭС для питания прямоточных котлов, имеющих повышенное гидравлическое сопротивление, было установлено питательные насосы типа П-150-5 с чрезмерно высоким напором-. Для снятия избыточного напора лопатки этих насосов были подрезаны, что позволило на каждом насосе снизить потребляемую мощность на 160 кВт (на 22%).

Имеются также значительные возможности снижения гидравлического сопротивления стояков систем отопления и, в частности регулирующих клапанов. Повсеместный переход на более чувствительную электронную автоматику регулирования безусловно позволит снизить сопротивление трубопроводов.

Опыт эксплуатации показал, что переход на одновременную параллельную работу автоматических регуляторов расхода на каждом стояке позволяет снизить общее сопротивление системы отопления 10-20%, причем качество работы отопительных приборов не ухудшается.

В условиях параллельной работы котельных установок и насосов, что в первую очередь относится к питательным и циркуляционным насосам, важно обеспечить рациональное распределение нагрузок между оборудованием и для всех эксплуатационных режимов выбрать наиболее выгодные комбинации работающих насосов [5]. Для этой цели на станции должны быть

проведены испытания и разработаны соответствующие графики использования питательных и циркуляционных насосов, что обеспечивает соблюдение наиболее экономичных режимов их работы.

Номенклатура выпускаемых в настоящее время насосов весьма обширна. Ранее одно из крупнейших в Советском Союзе предприятий, Уральский завод гидромашин, выпускал горизонтальные центробежные насосы типа Д, к которым относятся, например, насос 300Дх90 и насос Д-2000-34, применяемые в качестве подпиточных на ряде крупных тепловых электростанций до сих пор.

Для тепловых пунктов ранее выпускались вертикальные центробежные и высоконапорные многоступенчатые насосов. На теплоисточниках особое место занимают осевые и поворотн-лопастные насосы. Мощность таких насосов доходила до 7500 кВт и производительность до 54000 м<sup>3</sup>/ч. Эти насосы по праву называются уникальными и изготавливались по индивидуальному заказам.

До середины двадцатого века выпускались осевые насосы типа ПрВ, но с 1960 г. отечественная промышленность полностью перешла на выпуск более совершенных насосов типа О и ОН. Насосы типа ПрВ и заменяющие их насосы типа О и ОП в основном предназначались для обслуживания тепловых электростанций в качестве циркуляционных. Насосов типа ПрВ (20ПрВ-60, 30ПрВ-60, 40ПрВ-60 и 40ПрВ-60х2) было изготовлено более 300 единиц, и их все еще можно встретить в эксплуатации. Все выпускавшиеся ранее типоразмеры насосов в настоящее время заменяются соответствующими насосами производителей Grundfos, Magna, Wilo и др.; кроме того, выпуском насосного оборудования занимается ряд отечественных и китайских компаний. Такие насосы оснащаются электродвигателем с мокрым ротором и защищенным статором, не имеют сальниковых уплотнений, они просты по конструкции и надежны в эксплуатации.

Сопоставляя скорость протекания переходных тепловых и гидравлических процессов в системах централизованного теплоснабжения, по результатам теоретической части исследования можно сделать следующие выводы: условия возникновения их различны; характер гидравлических режимов – колебательный, а тепловых – асимптотический; скорость протекания процессов при гидравлических режимах на два-три порядка выше, чем тепловых; динамические свойства объекта, определяющие скорость протекания переходных процессов, во многом различны. Процессы теплоснабжения обладают большим самовыравниванием, а скорость изменения параметров при гидравлических возмущениях определяется скоростью распространения звуковой волны [11], при температурных – тепло аккумулирующими свойствами объектов [12].

В соответствии с п.6.2.60 Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок гидравлические режимы водяных тепловых сетей разрабатываются ежегодно для отопительного периода. Для моделирования потокораспределения в тепловых сетях предназначено несколько программно-расчетных комплексов [7, 9]. В настоящей работе использования информационно-вычислительная система ZuluThermo версии 7.0 среды Zulu версии 7.0, тепловые нагрузки и характеристика тепловых сетей приняты по состоянию на 2018 г.

Для исследования закономерностей в части установки оборудования на проектируемых тепловых документах была изучена рабочая документация по следующим строящимся или реконструируемым по России объектам:

Артемовский городской суд с пристройкой, г. Владивосток;

филиал Федерального государственного бюджетного учреждения культуры Московского художественного академического театра (МХАТа) им. А.П. Чехова по адресу: г. Москва, ЮАО, пересечение проспекта Андропова с Нагатинской улицей;

муниципальное казенное общеобразовательное учреждение Кадынская средняя общеобразовательная школа им. М.А.Четвертного (Костромская область);

здание страхового товарищества «Саламандра», 1913-1914 годы для размещения бюджетного учреждения культуры Омской области Омского областного музея изобразительных искусств им. М.А Врубеля, ул. Музейная, д. 4, г. Омск;

и др.

Время уделялось и на изучение относящихся к теме положений, изложенных в действующей на момент написания статьи (второй квартал 2019 года) нормативно-технической документации. Методы ситуационного изучения и причинно-следственного анализа, примененные при проведении настоящего исследования, более подробно описаны в [17, 18].

В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт, анализ, моделирование, изучение и обобщение и т. д.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В условиях рыночной экономики теплоснабжение стало услугой, а задачи обеспечения гидравлических режимов и снижения последствий переходных процессов не самоцелью, а лишь средством на пути обеспечения жителей, административных и коммерческих учреждений, а также объектов промышленного производства,

качественным и бесперебойным отоплением, ГВС, тепловой энергией для калориферов и технологических нужд [8]. С другой стороны, как показано в разделе Методы, решение этих задач невозможно без покупки и обслуживания дорогостоящего оборудования, для чего важны собираемость платежей и интенсивная работа с дебиторской задолженностью. Ориентация генерирующего и теплосетевого бизнеса на b2b или b2c модели крайне перспективна. Например, основной способ продвижения товаров и услуг b2c – это обычная массовая реклама. На сайтах теплоснабжающих организаций, как правило, уделяется достаточно внимания развитию различных платежных систем, информированию потребителей о задолженности, испытаниях и отключениях; в сети интернет и региональных СМИ появляется информация о различных акциях.

Любая организация, связанная с производством, распределением и потреблением тепловой энергии, может работать и в сфере b2b, и в сфере b2c, более того она вынуждена так работать, заключая договора с подрядными, энергосервисными, научно-исследовательскими организация или выходя на открытый рынок с тендерными закупками.

Следует понимать ряд общих закономерностей: так, физические лица покупают самое дорогостоящее из того, что могут себе позволить. Примером могут послужить многотарифные приборы учета или оборудование тепловых пунктов. Согласно правилам b2c продаж лучше продавать что-то относительно недорогое и пользующееся широким спросом – тепловую энергию. Юридические лица напротив покупают самое дешевое из того, что будет выполнять поставленную задачу: они будут стараться занижать тепловую нагрузку, отказываясь от вентиляции и ГВС, переходить на бездоговорное потребление. По модели b2b лучше продавать или покупать что-то достаточно крупное и дорогое, совершая всего по несколько сделок в месяц или в год – средства автоматизации, телемеханизации и диспетчеризации, насосное оборудование. А основной способ продвижения b2b – это личные встречи и затяжные переговоры.

На этапе проектирования процесс теплоснабжения считается стационарным и установившемся, а вероятность возникновения переходных процессов или отключения электроэнергии учитывается лишь при выборе предохранительных и обратных клапанов, а также оборудования, инициализирующего аварийное отключение насосов или теплоснабжающих систем потребителей.

Для поддержания температуры в системе отопления по заданному температурному графику (в 100% случаев 95/700С), как правило, предусматриваются двухходовые регулирующие клапана типа VFG2 ф=100 kVS=125 м<sup>3</sup>/ч с электроприводом. Циркуляционный насос (например, TP 100-390/2 производителя Grundfos),

чаще устанавливается на обратном трубопроводе, а подбирается с учетом потерь давления в системе отопления, трубопроводах и оборудовании теплового пункта, включая водоподогреватели отопления (при независимой схеме) и теплообменники ГВС (открытая схема присоединения в настоящее время не допускается). В 100% случаев предусмотрена установка двух насосов: одного – рабочего, одного – резервного. Подпитка системы отопления предусмотрена лишь в случае независимой схемы присоединения, тогда она осуществляется автоматически из обратного теплопровода. На подпиточном трубопроводе обычно также устанавливаются два насоса (один – рабочий, один – резервный), оборудованных системой плавного пуска, и расширительный бак (например, Reflex G1500). Системы теплоснабжения приточных установок присоединяются к тепловым сетям исключительно по независимой схеме. Установка циркуляционных насосов и подпиточного оборудования систем теплоснабжения приточных установок производится аналогичным, как и в случае независимых систем отопления, образом.

Системы ГВС присоединяются к тепловой сети по закрытой (требующей теплообменного оборудования) схеме, например, двухступенчатой смешанной; устройство циркуляционного трубопровода для обеспечения заданной температуры ГВС в часы минимального водоразбора в ряде случаев обязательно. К примеру, на ИТП здания филиала Федерального государственного бюджетного учреждения культуры Московского художественного академического театра (МХАТа) им. А.П. Чехова в первой ступени используется пластинчатый теплообменник Alfa Laval M6-FG (47 пластин), во второй ступени используется пластинчатый теплообменник TL6-BFG (37 пластин) того же производителя. Автоматическое поддержание заданной температуры горячей воды производится двухходовым клапаном типа VFG2 ф=65 kVS=50 м<sup>3</sup>/ч, также с электроприводом. Насос (например, UPS 65-180GB производителя Grundfos) устанавливается на циркуляционном трубопроводе, и также подбирается с учетом потерь давления.

В 80% случаев в качестве запорной арматуры предусматриваются фланцевые стальные шаровые краны, быстро отключающие элементы и обеспечивающие высокую степень защиты от последствий возникновения переходных процессов и деструктивных воздействий сетевой воды. На 4 из 7 рассмотренных объектов в качестве предохранительных клапанов применяются предохранительные клапана Presscor 320-1 Flamco.

На этапе эксплуатации основная (первая) причина необеспечения гидравлических режимов и

возникновения переходных процессов – недостаточное финансирование, как следствие недостаточные параметры на теплоисточнике в целом и необходимость их кратковременного снижения для проведения аварийно-восстановительных работ. Из-за таких работ в течение отопительного периода приходится дополнительно проводить так называемые профилактические отключения<sup>23</sup>. Недоотпуск тепла в результате каждого такого отключения составляет до 300 Гкал.

Признаком возникновения аварийной ситуации является резкое увеличение подпитки. Надзорным органом по отношению к теплоснабжающим организациям является территориальное управление Ростехнадзора. Необходимость быстрого устранения повреждения и нормализации гидравлического режима в период температур наружного воздуха близких к расчетной вынуждает идти на значительные финансовые траты, в т. ч. привлекать сторонние организации в качестве подрядных на кратковременный срок. Основная причина повреждаемости была и остается интенсивная наружная коррозия, имеющая ярко выраженный локальный характер. В местах пересечения с кабельными линиями, железнодорожными и трамвайными путями ситуация усугубляется действием электрохимической коррозии. Аварийные ситуации требуют проведения расследования, включающего в себя оценку действий персонала и указание причины инцидента.

При температуре теплоносителя в подающем трубопроводе ниже 60°C невозможна подача ГВС по закрытой схеме, приходится переходить на открытую. По температуре внутреннего воздуха в течение отопительного периода ведется работа с Государственной жилищной инспекцией, проводятся комиссионные обследования. Источниками жалоб чаще всего из года в год становятся одни и те же группы конечных потребителей, причем жалобы часто не обоснованы – представители теплоснабжающих организаций вызываются при температуре воздуха в помещениях выше 20°C.

На гидравлические режимы существенное влияние (вторая причина) оказывают и чрезмерные тепловые потери, поскольку снижение температуры автоматизированные потребители вынуждены компенсировать увеличением количества теплоносителя [10], что приводит к перерасходу сетевой воды. Третья причина – перерасход тепловой энергии в переходный период абонентами, потребляющими услугу отопления по нормативу, что хорошо показывают распечатки с приборов учета аналогичных зданий, где средства учета имеются. Что касается ГВС, то величина

<sup>2</sup> В омских домах отключают отопление из-за профилактических работ. URL: <https://ngs55.ru/news/more/65543151/>

<sup>3</sup> В Омске жители городка Нефтяников остались без отопления. URL: <http://kvnews.ru/news-feed/v-omske-zhiteli-gorodka-neftyanikov-ostalis-bez-otopleniya-i-goryachey-vody->

фактическая величина потребления редко превышает 80% от полученной при помощи теплотехнического расчета [4].

Сравнение распределения давлений было выполнено на примере системы централизованного теплоснабжения г. Омска. Была создана наглядная модель, включающая в себя пять наиболее мощных теплоисточников, более десяти насосных станций и более 180 групповых потребителей, нагрузка которых заносилась как сумма нагрузок потребителей, подключенных от каждой врезки каждой тепловой камеры. Анализ расчетных располагаемых напоров и соответствующих величин в контрольных точках теплосети, оборудованных штуцерами для манометров, показал отличие на 20-25%. Фактические и расчетные располагаемые напоры на тепловых пунктах контрольных потребителей, моделирование которых было выполнено с учетом сопротивления распределительных тепловых сетей, разнятся в диапазоне  $\pm 40\%$ . При этом почти в 80% случаев фактические располагаемые напоры значительно ниже соответствующих расчетных величин, что может быть объяснено сложившейся практикой эксплуатации, принятой в крупных системах централизованного теплоснабжения. Похожая ситуация была получена и с помощью пакета средств, описанных в [6].

Задание гидравлического режима производится теплоприготовительной установкой

теплоисточника. В качестве примера был рассмотрена схема установки наиболее крупного источника теплоснабжения в г. Омске – ТЭЦ-5.

Схема отпуска тепла от ТЭЦ-5 предусматривает выдачу тепловой мощности от теплофикационных установок турбин типа ПТ-80/100-130/13 и Т-175/210-130. Догрев сетевой воды до расчетных параметров обеспечивается восемью пиковыми бойлерами типа ПСВ-500 и пиковой водогрейной котельной с тремя котлами ПТВМ-180. Регулирование отпуска тепла принято по температурному графику  $150^{\circ}\text{C} \div 70^{\circ}\text{C}$ . Установленная тепловая мощность основного энергетического оборудования Омской ТЭЦ-5 составляет 1735 Гкал/час.

Сетевая вода по трубопроводам обратной сетевой воды из города и оранжереи поступает через тепловой пункт во всасывающие патрубки насосов СЭ 5000-70 I-го подъема, установленные в насосной (НГВС). Обратная сетевая вода насосами I-го подъема подается в главный корпус, где она подогревается в сетевых подогревателях типа ПСГ паром теплофикационных отборов турбин с давлением  $0,5 \div 3$  кгс/см<sup>2</sup>. Кроме этого сетевая вода в главный корпус может подаваться насосами летней подпитки через перемышку (ПС-11) между напорными коллекторами сетевых насосов I-го подъема и насосов летней подпитки (табл. 1).

**Таблица 1.** Технические характеристики теплосетевого насосного оборудования омской ТЭЦ-5

**Table 1.** Technical characteristics of the heating network pumping equipment of Omsk TPP-5

№ п/п	Наименование и тип насоса	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Давление, м вод. ст.	Кавитационный запас на всасе, не менее м вод. ст.	Температура перекачиваемой воды, не более С	Давление во входном патрубке, не более кгс/см <sup>2</sup>
Насосы I-го подъема:						
1.	Сетевые насосы СЭ-5000-70	5000	70	15	120	6
Насосы зимней подпитки:						
2.	300Дх90 (2 шт.)	900	24	5	80	
3.	Д-2000-34 (4 шт.)	1980	34			
4.	Д2000-100 (1 шт.)	1450	107			
Насосы летней подпитки:						
5.	СЭ-1250х140(Р) (НПТЛ-3,4,5)	2500	70		180	
6.	СЭ-2500х60 (НПТЛ-2).	2500	60		180	
7.	СЭ-2500х140 (НПТЛ-1)	2500	140		180	
Насосы II-го подъема:						
8.	СЭ-5000-160	5000	160	40	120	10

Критерии и пределы безопасного состояния и режима работы оборудования:

температура сетевой воды в магистральных трубопроводах не должна превышать  $150^{\circ}\text{C}$ ;

давление сетевой воды в магистральных трубопроводах не должно превышать 16 кгс/см<sup>2</sup>. Для защиты трубопроводов теплосети от

превышения давления (более 16 кгс/см<sup>2</sup>) выполнен трубопровод, соединяющий напорные и всасывающие коллектора насосов II-го подъема;

по водяной стороне подогревателя (ПСГ) турбин рассчитаны на давление не более 8,0 кгс/см<sup>2</sup>;

гидравлическое сопротивление ПСГ-5000-3,5-8-П составляет 0,93-1,31 кгс/см<sup>2</sup>;

кавитационный запас на входе сетевых насосов II-го подъема составляет не менее 4,0 кгс/см<sup>2</sup>;

при давлении воды перед насосами II-го подъема менее 2,5 кгс/см<sup>2</sup> запрещается их включение.

При увеличении давления воды на напоре сетевого насоса свыше 20 кгс/см<sup>2</sup> насос отключается защитой.

Для обеспечения заданного гидравлического режима крайне важно достичь потребления тепловой энергии в пропорциональном соответствии с расчетной тепловой нагрузкой, размер которой оговаривается договором, а информация о величинах на каждый вид теплотребления хранится в базах данных, используемых для расчета потокораспределения и начисления оплаты. Перспектива применения блокчейна в сфере теплоснабжения связана прежде всего с защитой таких баз данных и невозможности фальсификации записей в них. Наиболее важными базами данных на текущий момент являются те, которые содержат личную информацию о потребителях-физических лицах, сведения о юридических лицах, платежеспособности обеих категорий. В процессе роста степени оснащенности потребителей общедомовыми и индивидуальными коммерческими приборами учета возрастает роль информации о показаниях счетчиков, т. к. станет возможным выявлять факт бездоговорного или несанкционированного потребления тепловой энергии. Создание так называемой «умной теплосети», что предполагает работу приборов верхнего учета, установленных на границе распределительных и магистральных сетей<sup>4</sup>, еще более существенно увеличивает объем обрабатываемых данных. На примере системы централизованного теплоснабжения г. Тюмени несложно посчитать, что автоматизированная передача показаний с почти пяти тысяч приборов учета, которая для функционирования концепта «умной теплосети» должна производиться как минимум один раз в час, увеличит количество записей более чем на сорок миллионов. При достижении сколько-нибудь значительной доли элементов управления тепловыми сетями, оснащенных средствами телемеханизации (прежде всего запорной арматуры), целесообразным становится использования блокчейна для защиты таких элементов от несанкционированного изменения извне.

## ВЫВОДЫ

На основании рассмотрения проектов и проведенного ситуационного исследования на примере г. Омска были сделаны следующие выводы:

1. Анализ оборудования тепловых пунктов показывает необходимость разработки

математического метода моделирования звена тепловая сеть-потребитель, обеспечивающего быструю сходимость итерационного процесса.

2. На основании анализа особенностей эксплуатации систем централизованного теплоснабжения разработаны методы и алгоритмы улучшения сходимости для создаваемых математических моделей: автоматическое получение начальных приближений, учитывающих высокую повреждаемость тепловых сетей; устранение причин, оказывающих влияние на гидравлические режимы, формирования циклов обследования насосного оборудования; специальные алгоритмы для разрешения неопределенности, связанной с гидравлическими регуляторами расхода и давления.

3. Предложены пути развития теплосетевого бизнеса и улучшения качества теплоснабжения на основе технологий блокчейна и общепринятых b2c бизнес-моделей;

4. Разработаны способы решения функциональных задач, основанные на математической модели гидравлического режима.

5. Анализ математических моделей тепловых процессов систем централизованного теплоснабжения позволяет обосновать математическую модель теплового режима, основанную на совместном решении соотношений для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

6. Показан способ задания теплогидравлического режима на примере теплоприготовительной установки крупного теплоисточника.

7. Показана необходимость разработки интегральной математической модели теплогидравлического режима, учитывающей нестационарность тепловых процессов и транспортное запаздывание.

8. Оптимизация суточного режима тепловых пунктов на основе схемы динамического программирования оказывает существенное влияние на эксплуатационные показатели систем централизованного теплоснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, Y., You, S., Zhang, H., Zheng, X., Wei, S., Miao, Q., & Zheng, W. (2017). Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective. *Energy and Buildings*, 154, 373–390. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.034
2. Wang, H., Wang, H., Zhou, H., & Zhu, T. (2018). Modeling and optimization for hydraulic performance design in multi-source district heating with fluctuating renewables. *Energy Conversion and Management*, 156, 113–129. doi:10.1016/j.enconman.2017.10.078

<sup>4</sup> В энергетике Тюмени меняется система контроля. URL: <https://t.rbc.ru/tyumen/24/10/2017/59eee6f09a7947b03897a293>

3. Chicherin, S. V. (2018). Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 2019, 38(6), 603-614. doi:10.1080/14786451.2018.1548466
4. Чичерин С.В. Оптимизация потребления тепловой энергии зданиями: графики изменения нагрузки буднего и выходного дня // В сборнике: Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития Сборник научных трудов международной научной конференции. Томск, 2018. С. 58-60.
5. Сабанин В.Р., Аракелян Э.К., Андрушин А.В., Репин А.И. Современная концепция оперативного управления режимами работы оборудования ТЭЦ // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 12. С. 6-22.
6. Баландин В.С., Нешина Е.Г., Есимбекова А.К. Моделирование тепловых сетей ЖКХ // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 10 (27). С. 159-162.
7. Новицкий Н.Н., Гребнева О.А., Токарев В.В. Исследование эффективности методов активной идентификации для теплогидравлических испытаний тепловых сетей // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 54-63.
8. Шалагинова З.И. Разработка методики расчета узловых цен тепловой энергии на базе моделирования теплогидравлических режимов систем теплоснабжения для решения задач управления и оптимизации Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 96-108.
9. Пеньковский А.В., Стенников В.А. Математическое моделирование рынка тепловой энергии в формате единой теплоснабжающей организации // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 42-53.
10. Чичерин С.В., Збраз Л.И. Теплотехническая характеристика квартальной застройки – причина прекратить строительство микрорайонов // Известия КГАСУ, 2019, № 1 (47), с. 194-206.
11. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева О.А. Технология разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 1. С. 12-24.
12. Кислов Д.К., Рябенко М.С., Рафальская Т.А. Разработка системы интеллектуального теплоснабжения на базе информационной сети Zulu // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 2 (112). С. 55-59.
13. Луценко А.В., Новицкий Н.Н. Модифицированный метод динамического программирования для оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23. № 6. С. 47-63.
14. Монахов Г.В., Войтинская Ю.А. Моделирование управления режимами тепловых сетей. М.: Энергоатомиздат, 1995. - 224 с.
15. Емельянов Р.Т., Александрова А.Ф., Игнатъев Г.В., Шмидт В.К. Моделирование динамических режимов теплопровода системы теплоснабжения // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (127). С. 96-102.
16. Карев Д.С., Мельников В.М., Иванченко А.Б. Расчет потерь теплоты при ее передаче по теплопроводу с применением САД/САЕ-технологий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 4 (36). С. 65-73.
17. Курникова М.В. Метод кейс-стади в научно-исследовательской деятельности // В сборнике: Творческий потенциал - 2017 Сборник статей. Под редакцией С.А. Пиявского, З.Ф. Камальдиновой. 2018. С. 78-84.
18. Кочемасова Е.Ю. Причинно-следственный анализ как инструмент стратегического планирования // Инновации. 2018. № 4 (234). С. 36-42.

## REFERENCES

1. Wang, Y., You, S., Zhang, H., Zheng, X., Wei, S., Miao, Q., & Zheng, W. (2017). Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective. *Energy and Buildings*, 154, 373–390. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.034
2. Wang, H., Wang, H., Zhou, H., & Zhu, T. (2018). Modeling and optimization for hydraulic performance design in multi-source district heating with fluctuating renewables. *Energy Conversion and Management*, 156, 113–129. doi:10.1016/j.enconman.2017.10.078
3. Chicherin, S. V. (2018). Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 2019, 38(6), 603-614. doi:10.1080/14786451.2018.1548466
4. Chicherin S.V. Optimizing Building Heat Consumption: Weekday and Weekend Profiles. Proceedings of the International Conference ‘Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources’. Tomsk, 2018, 58-60.
5. Sabanin V.R., Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Repin A.I. The modern concept of the operational management of the modes of operation of CHP equipment // New in the Russian electric power industry. 2018. No. 12. S. 6-22.
6. Balandin V.S., Neshina E.G., Esimbekova A.K. Simulation of housing and utilities heat networks. Modern scientific research and development. 2018. No. 10 (27). Pp. 159-162.
7. Novitskii N.N., Grebneva O.A., Tokarev V.V. Investigation of Active Identification Methods for Thermohydraulic Testing of Heat Networks. *Thermal Engineering*. 2018. T. 65. № 7. С. 453-461.
8. Shalaginova Z.I. The Development of a Method for Calculating the Nodal Prices of the Thermal Energy by Modeling the Thermal and Hydraulic Regimes of the Heat Supply Systems for Solving Control and

Optimization Problems. Thermal Engineering. 2018. T. 65. № 10. C. 756-767.

9. Penkovskii A.V., Stennikov V.A. Mathematical Modeling of the Heat Energy Market on a Single Heat Supplier Basis. Thermal Engineering. 2018. T. 65. № 7. C. 443-452.

10. Chicherin S.V., Zbaraz L.I. Thermal performance of quarterly buildings – reason to stop building neighborhoods. News of the KSUAE, 2019, 1(47), 194-206.

11. Novitsky N.N., Shalaginova Z.I., Tokarev V.V., Grebneva O.A. The technique of development of operational modes based on methods of multilevel thermal hydraulic modeling. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2018. No. 1. P. 12-24.

12. Kislov D.K., Ryabenco M.S., Rafalskaya T.A. System engineering of the intellectual heat supply on the basis of information network Zulu. Energy Saving and Water Treatment. 2018. 2(112). pp. 55-59

13. Lutsenko A. V., Novitsky N. N. Modified method of dynamic programming for optimization of

hydraulic modes of distribution heating networks. Computational technologies. 2018, 6(23), pp. 47-63

14. Monakhov G.V., Voytinskaya Yu.A. Modeling of management of heating network modes. Moscow, Energoatomizdat, 1995. - 224 p.

15. Emelyanov R.T., Alexandrova A.F., Ignatyev G.V., Schmidt V.K. The simulation of dynamic modes of the heat pipe of heating system. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2017. № 4 (127). Pp. 96-102.

16. Karev D. S., Melnikov V. M., Ivanchenko A. B. Calculation of loss of thermal energy at its transmission on the heat pipe with application of CAD/CAE-technologies. Bulletin of the Kazan State Energy University. 2017. № 4 (36). Pp. 65-73.

17. Kurnikova M.V. Case study method in research activities. In the collection: Creative potential - 2017 Collection of articles. Edited by S.A. Piyavsky, Z.F. Kamalidinovoy. 2018. pp. 78-84.

18. Kochemasova E. Yu. Causal analysis as the instrument of strategic planning. Innovations. 2018. 4(234). pp. 36-42.

## DISTRICT HEATING SYSTEM HYDRAULIC MODEL AND TRANSIENT BEHAVIORS: CAUSE ANALYSIS

S.V. Chicherin

### Summary

**Materials and methods:** By using ZuluThermo, the fulfillment of the hydraulic head demands of all substations is calculated. In the case study, a district heating (DH) system in Omsk, Russia is illustrated to validate the proposed method.

**Results:** The common design method to the variable-speed pumps in a heat substation is reported. Based on a large central plant, a hydraulic characteristic of the heat source within a DH system with fluctuating hydraulic operation points is shown. The fluctuations of a heat load from design one have significant influence on the overall performance of a DH system. The results of comparative analysis show that an available head varies from 20% to 25%. Any mistake in ensuring hydraulic regime will lead to numerous complaints. The job of the company staff is to collect, consider, investigate, respond to, and where appropriate come to a conclusion about consumers' comments, concerns, and complaints in a prompt and timely manner, from a position of independence. Naturally, the fact that a complaint had been filed did not always mean that a violation had occurred. Matching customers to commodities is by now a well worn theme in cyberspace, but the DH companies' management remains limited on the issue. When 'old industry' companies start to look vulnerable, business to consumer companies - known as B2C, or B2B - business to business - companies are where investors headed.

**Conclusions:** Another novel idea, a blockchain is evolving from being based on rules, like passwords, to being automatic and made stronger through us just being us. Concerning the dynamic characteristic stability of heating substation largely affects the daily efficiency of a DH system.

**Key words:** district heating, pump, performance, pressure, network, water.

УДК [621.3.026:621.316.761.2].519.163

## ПРИЧИННЫЙ АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ УЯЗВИМОСТЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И СБОРА ДАННЫХ SCADA

Аметов Ф.Р., Бекиров Э.А.

ФГФУОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»  
Физико-технический институт,  
295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4  
\*E-mail: ametov.ferrat@gmail.com

**Аннотация.** В работе описано применение системы контроля и сбора данных SCADA, приведены ее основные уязвимости и их причины. Проведен анализ первопричин возникновения угроз и их последствий. Определены современные меры, обеспечивающие безопасную работу системы SCADA, на основе анализа которых, предложены собственные технические и информационные решения по улучшению отказоустойчивости системы.

**Ключевые слова:** SCADA, шифрование, алгоритмы, безопасность, уязвимости.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мы зависим от электричества для удовлетворения основных потребностей, таких как продовольствие, вода, жилье, связь, занятость и здравоохранение. Эти потребности удовлетворяются за счет инфраструктуры для сохранения продуктов питания, очистки воды, тепла и света, телефонная служба, Интернет, офисы, заводы, больницы и реагирования на чрезвычайные ситуации, чтобы назвать несколько. Но все эти предметы первой необходимости деградируют или исчезают без электричества.

Электроэнергия стала центральным компонентом того, что стало называться критической инфраструктурой, а одним из наиболее экономичных решений для повышения надежности, оптимизации работы, интеллектуализации управления и защиты сети энергосистем стало компьютерное управление. Широкое применение получила система контроля и сбора данных SCADA, которая имеет важную роль в работе энергосистемы. Как правило, система SCADA помимо задач по сбору данных, автоматизирует всю сеть распределения электроэнергии, выполняя функции удаленного мониторинга, координации в работе и управления. Системы SCADA в основном используются для внедрения системы контроля и управления оборудованием или установкой на многих производственных предприятиях электроэнергетики [1].

Однако, все более широкое использование систем SCADA для управления энергетическими системами обеспечивает все большую способность вызывать серьезные повреждения и нарушения с помощью кибер-средств. Экспоненциальный рост сетей информационных систем, объединяющих бизнес, административные и операционные системы, способствует уязвимости системы [2].

### АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Системы SCADA активно обсуждаются в зарубежных и отечественных литературных

источниках. Большое внимание уделяется вопросам архитектуры внутри системы, согласование между множеством ее компонентов. Так, например, в обзорной статье о системе “SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition” [2] широкое внимание уделяется вопросам автономности отдельных компонентов системы с учетом возможных рисков и угроз. В другой статье “Industrial Network Security:

Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems” [3] уделено внимание критическим уязвимостям системы и предложены варианты для их устранения.

Во множестве литературных источников, которые рассматривают систему SCADA как многофункциональную распределенную систему, рассматриваются уязвимости системы, связанные с низкой отказоустойчивостью, чувствительностью к вирусам и другому вредоносному программному обеспечению, а также недостаточной подготовкой обслуживающего персонала.

Для обеспечения целостности системы, необходимо, также, соблюдение общих требований информационной безопасности. В данной статье предлагается модернизация системы аутентификации пользователей в системе SCADA, которая практически исключит возможность взлома системы управления и обеспечит информационную защиту системы и персонала.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

SCADA security в электроэнергетике страдает от широко распространенных заблуждений и сбоев в коммуникациях между администраторами и экспертами по безопасности.

Основные уязвимости энергосистем:

- Утечка данных;
- Промышленный шпионаж;
- Инсайдерские угрозы;
- Саботаж.

Уязвимым в электростанции является система управления, известная как SCADA (диспетчерский контроль и сбор данных). Большинство систем

SCADA используют программное обеспечение human-machineinterface (HMI), которое позволяет пользователям взаимодействовать с машинами и устройствами и управлять ими. Если хакер сможет получить доступ к этой управляющей программе, то вся система будет подвержена кибератаке [3].

Системы SCADA лежат в основе практически всей современной промышленности, включая энергетический сектор. И есть простая причина, почему они уязвимы для атак: архитектура SCADA была разработана до того, как кибербезопасность была проблемой (рис. 1).



Рис. 1. Основные уязвимости SCADA – систем

Fig. 1. Main vulnerabilities of SCADA - systems

1. Системы SCADA, управляющие электрогенераторами и распределительными системами, на самом деле не изолированы воздушными зазорами из Интернета.

2. Напротив, группы анализа уязвимостей систематически и неоднократно демонстрировали, что энергетические компании не знают о реальности их взаимосвязанности и уязвимости.

3. Есть документированные случаи промышленного шпионажа, саботажа, отказа в обслуживании, и вредоносных атак на электросети SCADA систем.

4. Системы SCADA считались слишком стабильными для обновления с помощью текущих патчей; в результате они постоянно уязвимы для использования текущих (и даже старых) уязвимостей [4].

Электроэнергетика должна координировать свои усилия по внедрению устоявшихся стандартов защиты компьютерных систем и сетей во всех своих системах SCADA и связанных с ними сетях. Кроме того, отрасль должна внедрить решения для повышения осведомленности о кибер-ситуации, чтобы интегрировать множество материалов от SCADA и сетевых датчиков, которые позволят разумно, гибко реагировать на атаки и эффективно проводить судебно-медицинский анализ этих атак (рис. 2).

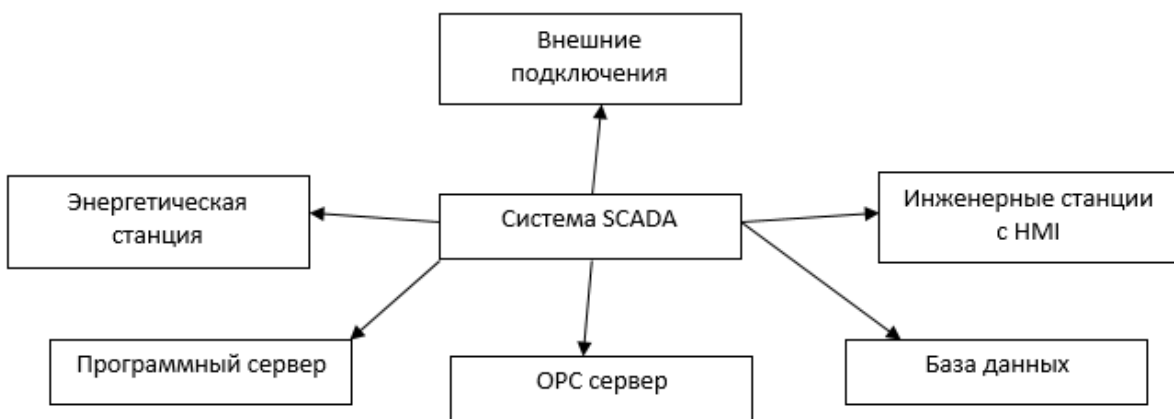


Рис. 2. Схема составляющих системы SCADA

Fig. 2. SCADA system components diagram

Основные виды атак на SCADA-системы:

- Внутренние атаки
- Атаки прошивки ICS
- Поливочные атаки
- Оперативные технологические атаки через скомпрометированные корпоративные сети
- Автоматизированные атаки, malwares и botnets

**Обоснование собственных предложений.** Защита должна быть не только многоуровневой, но и многозначной, включая

безопасность вокруг программных систем, физической инфраструктуры и осведомленности человека.

Во-первых, менеджеры завода должны убедиться, что их программное обеспечение полностью в курсе последних обновлений и исправлений, которые исправляют известные уязвимости и соответствуют международным стандартам. (Первый такой стандарт, сертификат SDLA, был выпущен в июле американским Институтом соответствия безопасности ISA. Он удостоверяет, что поставщик проектировал

кибербезопасность в процессы разработки и поддержки жизненного цикла своих продуктов и последовательно следует за ними. Другие стандарты в процессе.)

Необходимо обращать внимание на кибербезопасность во всех аппаратных и программных средствах энергосистем, которые составляют их ИС. Это включает в себя обеспечение того, чтобы они выполняли достаточную проверку контроля безопасности своих поставщиков программного обеспечения.

Далее, менеджеры завода должны тщательно документировать любые изменения, внесенные в завод, создавая систему управления изменениями для отслеживания изменений [5].

Энергетические и коммунальные компании должны гарантировать, что они защищают свои критические активы и смягчают риск атаки, применяя многоуровневый подход к безопасности данных. Это означает обеспечение безопасности традиционных ИТ-систем, SCADA, ICS и их контроллеров процессов с помощью централизованной системы, способной контролировать, управлять, контролировать и отчитываться обо всем удаленном и привилегированном доступе к учетной записи.

Руководителям заводов необходимо организовать кампании по повышению осведомленности среди сотрудников, чтобы избежать инцидентов с человеческим фактором.

Некоторые из ключевых стратегий, направленных на снижение уязвимости, включают в себя предоставление ограниченного доступа к безопасности и удаленного доступа к небольшому числу высококвалифицированных сотрудников. Для обеспечения безопасности смарт-сетки алгоритм используется для создания ответа на основе предыдущего опыта. Этот термин в народе придуман как вычислительный интеллект [6].

Лучше всего подключить управляющую сеть к другой сети через брандмауэр, далее подключив все другие устройства только к одной сети.

При выстраивании защиты объекта энергетического комплекса необходимо исключить несанкционированные воздействия на оборудование энергетике – команды и нарушение связи между подстанциями. В сфере энергетического комплекса используются общепризнанные механизмы обеспечения информационной безопасности. Для защиты технологических сетей, как правило, специфических инструментов не применяется. Специфика защиты промышленных объектов заключается в том, что средства защиты ни в коем случае не должны повлиять на технологический процесс. К таким средствам, например, относятся анализаторы сетевого трафика, подключенные через дата-диод.

Специалистам необходимо обратить внимание на защиту микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств – терминалы РЗА (релейной защиты и автоматики), контроллеры

присоединения, измерительные преобразователи, АРМы. Данное оборудование применяется для управления и контроля над процессом передачи электроэнергии, а также предотвращения повреждения высоковольтного оборудования в аварийных ситуациях. Эксплуатация уязвимостей подобного оборудования и используемых им сетевых протоколов может позволить злоумышленнику влиять на технологический процесс. Также не стоит обходить стороной защиту сетевого оборудования, в том числе на котором организована передача информации за периметр подстанции в диспетчерские центры [7].

С точки зрения обеспечения ИБ АСУ ТП есть ряд важных задач. Во-первых, современные АСУ ТП предприятия объединены в промышленные сети и в большинстве своем связаны с офисными сетями, а в некоторых случаях и с интернетом. Все это требует соответствующей защиты с точки зрения межсетевого разделения трафика. Второй важной задачей является защита рабочих мест операторов и SCADA-серверов от вредоносного ПО, запуска неразрешенных приложений и подключения неучтенных внешних накопителей и других устройств. И третьей важной задачей обеспечения должного уровня ИБ АСУ ТП является защита промышленных контроллеров от несанкционированного доступа к ним, изменения исполняемого в них кода и отправки на них некорректных команд. В настоящее время для решения первой задачи применяются так называемые однонаправленные шлюзы, а для двух других – комплексные решения по защите компонентов АСУ ТП.

Все системы SCADA различаются между собой набором инфраструктуры. Одни используют низкоуровневые электронные устройства на базе микроконтроллеров, другие используют высокоуровневые устройства на базе современных микропроцессоров. Поскольку SCADA – обширная система взаимосвязанных электронных устройств разных типов и уровней, критически важным остается вопрос защиты, обмена и хранения информации между информационными блоками. Наиболее эффективными средствами защиты информации могут служить криптографические шифровки данных [8].

Для примера рассмотрим произвольную SCADA-систему на предприятии электроэнергетики. Допустим, что система состоит из нескольких произвольных устройств связи, нескольких компьютеров с возможностью удаленного подключения к информации, ее изменения и добавления и нескольких мониторинговых устройств. Передача информации между узлами идет в виде сигнала, состоящего из последовательности символов, уловителями которого являются микропроцессоры и микроконтроллеры. Зачастую, причиной кражи и взлома информации является незащищенность данных узлов. Поэтому, для обеспечения безопасности и контроля трафика внутри сети

системы SCADA рекомендуется использовать криптографическое шифрование данных для маскирования сигналов и идентификации пользователей.

Существует множество методов шифрования данных, которые отличаются исключительными подходами к преобразованию информации. Эффективность алгоритмов шифрования выражается в нескольких показателях:

- время выполнения алгоритма;
- кроссплатформенность;
- уровень защиты информации;
- устойчивость к взлому;
- потребление ресурсов.

Все алгоритмы можно разделить на 2 типа: симметричные и ассиметричные. Ассиметричные алгоритмы считаются более надежными, поскольку в них используются 2 ключа шифрования – публичный и приватный. Внутренняя аутентификация внутри системы SCADA должна происходить посредством применения сертификатов доверия, которые, в свою очередь, основаны на алгоритмах ассиметричного шифрования (RSA и ECC) [9].

Проанализировав основные криптографические алгоритмы, критерии их надежности и эффективности, к реализации криптографической защиты информации внутри SCADA рекомендуется ассиметричный алгоритм NTRU.

Это алгоритм с открытым ключом, который реализует протоколы IEEE 1363.1 и X9.98.

Предположим, что алгоритм NTRU представляет собой решетку, звеньями которой являются кольца полиномов, состоящих из усеченных многочленов степени  $N-1$ . Расшифровка и шифровка данных проходит векторно, при нахождении кратчайшего пути.

Из определения следует, что формулировка кольца является следующей:

$$R = Z[X] / (X^N - 1)$$

Работа алгоритма включает в себя 3 этапа: формирование ключа шифрования, шифровка и дешифровка.

Предположим, мы хотим создать пару публичный/приватный ключ для криптосистемы NTRU.

1. Берем два произвольных многочлена относительно случайного многочлена  $\text{mod } q$ , один из которых является закрытым ключом  $f$ , а второй используется для генерации открытого ключа  $g$ .

2. Вычисляем обратное  $f^{-1}$  по модулю  $q$  и обратное  $g^{-1}$  по модулю. Полином  $f$  выбирается таким образом, чтобы инверсии  $f^{-1}$  существовали.

$$f^{-1} \cdot f = 1 \pmod{q} \text{ and } f^{-1} \cdot g = 1 \pmod{p}$$

3. Вычисляем полином  $h$ . Получаем закрытый ключ, где  $f$  и  $f^{-1}$  – его многочлены.

$$h = p f g^{-1} \pmod{q}$$

Для шифрования и передачи информации с использованием NTRU необходимо преобразовать информацию в вид малого полинома по модулю  $q$ , в

результате чего получим многочлен, представляющий зашифрованное сообщение.

$$e = p r^{-1} \cdot h + m \pmod{q}$$

Для дешифровки сообщения получаем полином  $a$ :

$$a = f^{-1} \cdot e \pmod{q}$$

Поскольку при вычислении используется  $\text{mod } q$ , коэффициенты выбираются следующие: между  $-q/2$  и  $q/2$  [10].

Исходным, дешифрованным сообщением будет модуль, который находится по формуле:

$$c = f p^{-1} \cdot b \pmod{p}$$

Пример:

Допустим, необходимо сгенерировать ключ шифрования и дешифрования. Выбираем полином степени 10 с четырьмя 1 и четырьмя -1 и полином степени 10 с тремя 1 и тремя -1. В результате получаем следующее:

$$f = -1 + X + X^2 - X^4 + X^6 + X^9 - X^{10}$$

$$g = -1 + X^2 + X^3 + X^5 - X^8 - X^{10}$$

Вычисляем обратный  $f^{-1}$  из  $f$  по модулю  $p$  и обратный  $f^{-1}$  из  $f$  по модулю  $q$ . Получаем результат:

$$f^{-1} = 1 + 2X + 2X^3 + 2X^4 + X^5 + 2X^7 + X^8 + 2X^9$$

$$f^{-1} = 5 + 9X + 6X^2 + 16X^3 + 4X^4 + 15X^5 + 16X^6 + 22X^7 + 20X^8 + 18X^9 + 30X^{10}$$

Последним шагом при генерации ключа будет нахождение полинома  $h$ :

$$h = p f g^{-1} = 8 + 25X + 22X^2 + 20X^3 + 12X^4 + 24X^5 + 15X^6 + 19X^7 + 12X^8 + 19X^9 + 16X^{10} \pmod{32}$$

В результате получим, что сгенерированный закрытый ключ – это пара  $f$  и  $f^{-1}$ , а публичный – полином  $h$ .

Допустим, необходимо отправить следующее сообщение:

$$m = -1 + X^3 - X^4 - X^8 + X^9 + X^{10}$$

Применяем публичный ключ и получаем:

$$h = 8 + 25X + 22X^2 + 20X^3 + 12X^4 + 24X^5 + 15X^6 + 19X^7 + 12X^8 + 19X^9 + 16X^{10} \pmod{32}$$

Берем случайный полином  $g$ :

$$r = -1 + X^2 + X^3 + X^4 - X^5 - X^7$$

В результате чего получаем зашифрованное сообщение:

$$e = r \cdot h + m = 14 + 11X + 26X^2 + 24X^3 + 14X^4 + 16X^5 + 30X^6 + 7X^7 + 25X^8 + 6X^9 + 19X^{10} \pmod{32}$$

Для дешифровки сообщения  $e$  используем приватный ключ  $f$ :

$$a = f^{-1} \cdot e = 3 - 7X - 10X^2 - 11X^3 + 10X^4 + 7X^5 + 6X^6 + 7X^7 + 5X^8 - 3X^9 - 7X^{10} \pmod{32}$$

$$b = a = -X - X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 - X^8 - X^{10} \pmod{3}$$

$$c = f p^{-1} \cdot b = -1 + X^3 - X^4 - X^8 + X^9 + X^{10} \pmod{3}$$

Полученный полином  $c$  – является исходным зашифрованным сообщением.

Для определения эффективности любого алгоритма необходимо, прежде всего, ориентироваться на время выполнения. Используя полученные статистические данные можно рассчитать время выполнения алгоритма NTRU (таблица 1).

**Таблица 1.** Анализ время исполнения алгоритма NTRU

**Table 1.** Analysis of the execution time of the NTRU algorithm

Зашифровка текстового блока	$(N-K) \log_2 P$
Скорость шифровки	$O(N^2)$
Скорость дешифровки	$O(N^2)$
Генерация приватного ключа	$2N \log_2 P$
Генерация публичного ключа	$N \log_2 Q$

Для сравнения эффективности были взяты алгоритмы шифрования NTRU, RSA и ECC [11].

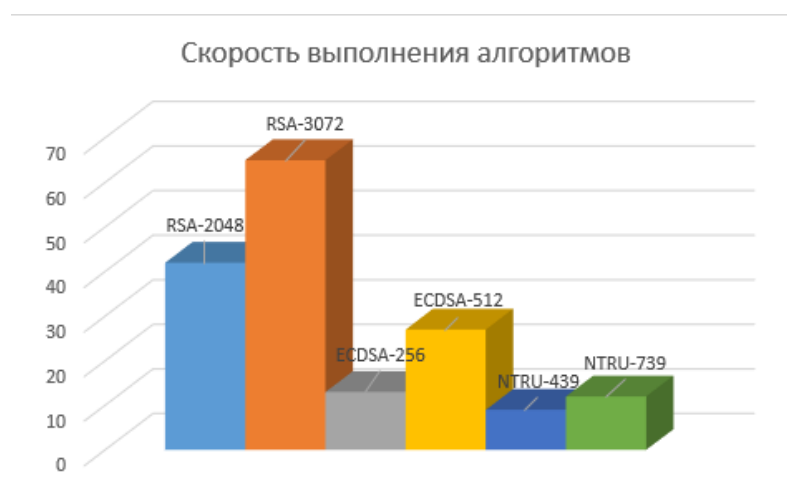
**Таблица 2.** Сравнительная характеристика основных криптографических алгоритмов

**Table 2.** Comparative characteristics of the main cryptographic algorithms

Алгоритм	Генерация ключей	Шифрование	Дешифрование
RSA-1024	21.27	0.45	1.25
RSA-2048	90.51	0.52	3.03
RSA-3072	233.68	0.59	9.48
NTRU-439	6.27	0.28	0.22
NTRU-743	9.94	0.32	0.25

В результате анализа эффективности криптографических алгоритмов можно сделать вывод, что чем длиннее ключ шифрования, тем больше времени уходит как на его генерацию, так и на шифровку и дешифровку информации. Также,

следует учесть тот факт, что NTRU значительно эффективнее и быстрее алгоритма RSA и рассчитан на обслуживание крупных систем, например, таких как SCADA (рис. 3).



**Рис. 3.** Эффективность выполнения алгоритмов (мс)

**Fig. 3.** Efficiency of execution of algorithms (ms)

На рисунке 3 изображена сравнительная инфографика оптимального времени выполнения шифровки/дешифровки информации различными

алгоритмами в миллисекундах. Лидирующие позиции занимает алгоритм NTRU.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационная безопасность является важнейшей составляющей SCADA-систем. Множество рисков, связанных с безопасностью, такие как: заражение вредоносным программным обеспечением, взлом информационных комплексов, происходят непосредственно внутри системы. Поэтому, очень важно обезопасить систему еще на этапе аутентификации, что не даст возможности злоумышленникам внедриться в систему управления комплекса. Одним из таких решений являются криптографические ключи и протоколы безопасности, основанные на современных алгоритмах шифрования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Daneels. What is SCADA? / A. Daneels, W. Salter. - International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1999, Trieste, Italy
2. Stuart A. Boyer. Scada: Supervisory Control And Data Acquisition / Stuart A. Boyer. - International Society of Automation, USA 2009 - 257 p.
3. Eric D. Knapp. Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems / Eric D. Knapp, Joel Thomas Langill. - Elsevier Science, 2014. - 460 p.
4. Yilin Mo. Detecting Integrity Attacks on SCADA Systems / Yilin Mo, Rohan Chabukswar, Bruno Sinopoli. - IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013. - 1396 p.
5. Bill Miller. A Survey of SCADA and Critical Infrastructure Incidents / Bill Miller, Dale C. Rowe Ph.D. - Brigham Young University Information Technology Program, 2012
6. YuliaCherdantseva. A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems / YuliaCherdantseva, PeteBurnapa, AndrewBlyth, PeterEden, KevinJones, HughSoulsby, KristanStoddart. - Computers & Security, Volume 56, 2016.
7. Y. Yang. Multiattribute SCADA-Specific Intrusion Detection System for Power Networks / Y. Yang, K. McLaughlin, S. Sezer, T. Littler, E. G. Im, B. Pranggono, H. F. Wang. - IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 1102 p.
8. Yichi Zhang. Power System Reliability Evaluation With SCADA Cybersecurity Considerations / Yichi Zhang, Lingfeng Wang, Yingmeng Xiang, Chee-Wooi Ten. - IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 1707 p.
9. Jonathan Katz. Introduction to Modern Cryptography, Second Edition / Jonathan Katz, Yehuda Lindell. - CRC Press, 2015, 577 p.
10. Leo Ducas. Efficient Identity-Based Encryption over NTRU Lattices / Leo Ducas, Vadim Lyubashevsky, Thomas Prest. - International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security. Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2014, p. 22-41
11. Jens Hermans. Speed Records for NTRU / Jens Hermans, Frederik Vercauteren, Bart Preneel. - Cryptographers' Track at the RSA Conference. Topics in Cryptology - CT-RSA 2010, p. 73-88

## REASONAL ANALYSIS OF CRITICAL VULNERABILITY OF SCADA CONTROL AND DATA SYSTEM

Ametov F.R., Bekirov E.A.

**Summary** The paper describes the application of the SCADA monitoring and data collection system, its main vulnerabilities and their causes are given. The analysis of the root causes of threats and their consequences. Modern measures have been identified to ensure the safe operation of the SCADA system, based on the analysis of which, their own technical and information solutions have been proposed to improve the system's fault tolerance.

**Key words:** SCADA, encryption, algorithms, security, vulnerabilities.

УДК 620.92

## ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия,  
kuvshinov.vladimir@gmail.com; bekirov.e.a@cfuv.ru

**Аннотация.** С развитием мирового технического потенциала и значительными объемами увеличения производства энергетических установок для солнечной энергетики появилась новая возможность использования комбинированных солнечных установок для термофотоэлектрического преобразования потока падающей солнечной радиации. На кафедре «Возобновляемые источники энергии» Севастопольского государственного университета, института ядерной энергии и промышленности бала разработана и исследована теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхностью. Предложенная установка состоит из абсорбера теплового гелиоколлектора, поверх которого расположены монокремниевые солнечные элементы. Вся установка представляет собой комбинированный гелиопрофиль, который монтируется в кровлю зданий и сооружений. Данная конструкция предназначена для увеличения мощностных характеристик преобразователей солнечной энергии. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали значительную эффективность предложенной конструкции, а также увеличение суммарного КПД установки при учете КПД работы фотоэлектрических преобразователей и КПД теплового абсорбера, используемого для нагрева теплоносителя. Увеличение суммарного КПД установки происходит за счет различий в преобразовании солнечной радиации абсорбером и фотоэлементами. Если кремниевые элементы преобразуют в основном ультрафиолетовую и незначительную часть коротковолнового видимого излучения, то тепловой абсорбер преобразует инфракрасную и длинноволновую часть видимого излучения. Принцип работы установки заключается в следующем: солнечные лучи падают на монокремниевые фотоэлектрические преобразователи, которые имеют селективное покрытие и поглощают до 95 % всего падающего спектра, при этом фотоэлементы преобразовывают ультрафиолетовую и коротковолновую видимую солнечную радиацию с КПД преобразования около 15-17 %, а остальная энергия идет на их нагрев, что только ухудшает их рабочие характеристики и оставляет почти 80 % поглощенной энергии спектра невостребованной. Далее тепловой абсорбер поглощает невостребованную при фотоэлектрическом преобразовании энергию и происходит нагрев теплового носителя, который может использоваться потребителями.

**Предмет исследования.** Тепловые и электрические характеристики комбинированного абсорбера термофотоэлектрической установки.

**Материалы и методы.** В работе были проведены исследования действующей модели термофотоэлектрической установки в натуральных условиях, использовались методы прямых измерений значений тока и напряжения фотоэлектрических преобразователей при изменяемом нагрузочном сопротивлении, а также методы измерений тепловых характеристик жидкого теплоносителя.

**Результаты.** Значительно повышен суммарный коэффициент преобразования потока падающей солнечной радиации при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии.

**Выводы.** По результатам экспериментов можно сделать заключение об эффективности работы солнечных установок с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии.

**Ключевые слова:** абсорбер, фотоэлектрические преобразователи, теплофотоэлектрическая установка, кремниевые солнечные элементы, гелиопрофиль, термофотоэлектрическое преобразование солнечной энергии.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем солнечной энергетики является недостаточный энергетический потенциал падающей солнечной радиации и низкий КПД фотопреобразователей и других солнечных установок. Для повышения эффективности работы данных систем необходимо более полное использование потока энергии падающего на рабочие поверхности солнечных установок.

Да данном этапе для преобразования солнечной энергии в гелиотехнике используют в основном фотоэлектрические модули, для выработки электрической энергии и тепловые гелиоколлектора для нагрева теплоносителя. Однако с современным развитием науки и техники все больше стало появляться солнечных установок, при работе которых с одной и той же рабочей поверхности одновременно может вырабатываться тепловая и электрическая энергия. Такие установки можно с уверенностью отнести к новому классу

гелиотехники термофотоэлектрические солнечные установки. Эти установки одновременно преобразуют всю падающую на них солнечную радиацию в тепло и электроэнергию, т.е. одновременно нагревают теплоноситель и являются электрическим генератором постоянного тока [1].

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В различных литературных источниках описаны исследования солнечных фотоэлектрических и тепловых установок [2-4]. При этом в некоторых источниках приводятся различные комбинации комбинированных гибридных фототепловых установок [1, 3].

Использование комбинированных тепло-фотоэлектрических установок дает заметную экономию материалов для их изготовления на единицу мощности, увеличивает их суммарный КПД и эффективность использования [1]. Это объясняется тем, что абсорберы тепловых гелиосистем и фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей преобразуют различные длины волн солнечного спектра, поэтому с одной рабочей поверхности можно получать как тепловую, так и электрическую энергию. Производство гелио-фотоэлектрических панелей на основе серийных установок позволит сократить затраты на выпуск абсорберов с дорогими селективными покрытиями и на материалы для производства конструкций фотоэлектрических модулей, объединив их в одну установку [2].

Главной проблемой применения солнечных установок является невысокая плотность потока солнечной радиации, преобразовываемой в тепловую и электрическую энергию, их низкий КПД и эффективность использования, как следствие высокая себестоимость за единицу мощности. Невысокий термический потенциал солнечной энергетики определяет более высокие требования к эффективности использования солнечных установок для электрообеспечения и теплоснабжения, к методам определения основных параметров эффективности, как фотоэлектрических модулей, так и гелиоколлекторов. За счет комбинирования плоского теплового абсорбера и фотоэлектрической батареи можно создать конструкцию, позволяющую более эффективно использовать падающую солнечную радиацию и повысить коэффициент преобразования.

Современные промышленные монокремниевые и поликремневые солнечные элементы имеют плоскую конструкцию, их КПД составляет 17-20 %, при коэффициенте поглощения до 95 %. При преобразовании солнечной энергии 80 % энергии идет в основном на тепловой нагрев элементов, что только ухудшает их качественную работу. Расположив солнечные элементы поверх теплового абсорбера гелиоколлектора, при эффективном теплообмене создается возможность для

увеличения КПД всей установки. Отвод тепла теплоносителем, циркулирующим по контуру гелиосистемы, препятствует перегреву фотопреобразователей и соответственно повышает суммарную выработку электрической энергии. Высокий коэффициент поглощения солнечных элементов дает возможность до 80 % поглощенной ими солнечной энергии пойти на нагрев приемной поверхности теплового абсорбера. Коэффициент преобразования до 80 % является высоким показателем для многих абсорберов промышленных тепловых солнечных установок.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье описаны исследования и рассмотрен принцип работы, комбинированной термофотоэлектрической установки, произведен расчет её тепловых и электрических характеристик.

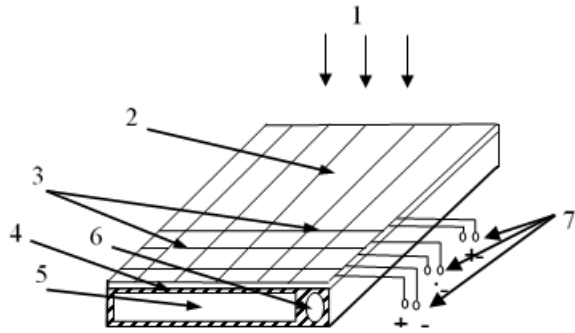
Целью проведенного исследования было теоретическое и экспериментальное подтверждение повышения эффективности использования потока падающей солнечной радиации, термофотоэлектрической установкой и увеличения коэффициента преобразования с единицы площади её приемной поверхности.

Все эксперименты проводились на территории кафедры «Возобновляемые источники энергии» Севастопольского государственного университета, института ядерной энергии и промышленности в сходных условиях, а именно при постоянной солнечной освещенности во время проведения эксперимента, с одними и теми же измерительными приборами [6].

При проведении исследований использовался метод прямых измерений по току и напряжению фотопреобразователя при переменном нагрузочном сопротивлении и методы температурных измерений теплоносителя. Эксперименты проводились в натуральных условиях на открытой площадке, при естественном солнечном освещении.

Комбинированная тепло-фотоэлектрическая установка (рис.1) представляет собой полноразмерный промышленный гелиопрофиль, предназначенный непосредственно для монтажа кровельного покрытия жилых домов. Внутри гелиопрофиля находятся трубки для жидкого теплоносителя и полости (каналы) для воздуха или теплоаккумулирующего материала.

Такие гелиопрофиля способны покрывать до 7 м кровли по высоте и неограниченную площадь по ширине. На приемной поверхности гелиопрофиля находятся солнечные элементы, спаянные последовательно в цепочку по 36 шт. Фотоэлементы, крепятся к приемной поверхности при помощи специальной теплопроводящей пасты с большим омическим сопротивлением. Элементы покрывают от 1/3 до 1/2 нижней части гелиопрофиля (рис.1).



**Рис. 1** Теплофотоэлектрическая установка

1 – падающая солнечная радиация; 2 – теплопоглощающая поверхность; 3 – солнечные элементы; 4 – стенки поглощающей поверхности гелиопрофиля; 5 – воздушный канал; 6 – канал для воды; 7 – выходные электрические контакты солнечных элементов.

**Fig. 1** Thermoelectric installation

1 - incident solar radiation; 2 - heat-absorbing surface; 3 - solar cells; 4 - walls of the absorbing surface of the helioprofile; 5 - air channel; 6 - channel for water; 7 - output electrical contacts of solar cells.

За счет низкой температуры и циркуляции теплоносителя происходит охлаждение элементов, что улучшает качество их работы. Т.к. кремниевые солнечные элементы преобразуют отличную от теплового абсорбера часть спектра, происходит общее увеличение энерговыработки.

Теоретическое описание работы абсорбера термофотоэлектрической установки описывается по формулам (1-4) по следующей методике [7]:

Максимальная мощность  $P_{max}$ , вырабатываемая солнечной батареей выражается:

$$P_{max} = F_{ff} I_{K3} U_{XX} = I_{max} U_{max} \quad (1)$$

где  $F_{ff}$  - фактор заполнения ВАХ;  $I_{K3}$  – ток короткого замыкания;  $U_{XX}$  – напряжение холостого хода;  $I_{max}$  – ток в рабочей точке;  $U_{max}$  – напряжение в рабочей точке.

КПД фотоэлектрической солнечной батареи рассчитывается по известной формуле:

$$\eta_{CB} = \frac{I_{max} U_{max}}{S_{эл.} E_o} = \frac{P_{max}}{S_{эл.} E_o} \quad (2)$$

где:  $S_{эл.}$  – полезная площадь солнечных элементов ( $m^2$ );  $E_o$  – освещенность рабочей поверхности ( $Вт/ m^2$ ).

Соответственно расчет теплового абсорбера производится также известным методом. Полезная энергия  $Q_u$ , отводимая из коллектора в единицу времени (Вт), равна [13]:

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (3)$$

где:  $A$  – площадь коллектора,  $m^2$ ;  $F_R$  – коэффициент отвода теплоты из коллектора;  $I_T$  – плотность потока суммарной солнечной радиации в

плоскости коллектора (с учетом углового коэффициента  $R$ ),  $Вт/м^2$ ;  $\tau$  – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению;  $\alpha$  – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению;  $U_L$  – полный коэффициент тепловых потерь коллектора,  $Вт/(m^2 \text{ град})$ ;  $T_i$  – температура жидкости на входе в коллектор,  $^{\circ}C$  (на номинальном режиме);  $T_a$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}C$ .

Упрощенный вариант этой формулы более применим для практических расчетов:

$$Q_u = S_{СК} G C_p (T_{вых} - T_i) (Вт), \quad (4)$$

где  $S_{СК}$  – площадь коллектора,  $m^2$ . Соответственно КПД солнечного коллектора определяется формулой:

$$\eta_{СК} = \frac{Q_u}{S_{СК} E_o} \quad (5)$$

Для комбинированной установки освещенность  $E_o$  одинакова для тепловой и электрической части, а величины площадей  $S_{СК}$  и  $S_{эл.}$ , эквивалентны, т.е. можно записать:

$$\eta_{СК} = \frac{P_{СК}}{S_{СК} E_o}, \eta_{СБ} = \frac{P_{СБ}}{S_{СК} E_o} \quad (6)$$

где  $\eta_{СК}$  – тепловой, а  $\eta_{СБ}$  – электрический КПД комбинированной установки,  $P_{СК}$  и  $P_{СБ}$ , мощность отводимая от теплового коллектора и солнечной батареи,  $S_{СК}$  – полезная площадь комбинированной солнечной установки, заполненная солнечными элементами.

Общая мощность комбинированной установки равна сумме мощностей тепловой и фотоэлектрической частей установки:

$$P_{КСК} = P_{СК} + P_{СБ} = S_{КСК} E_o (\eta_{СК} + \eta_{СБ}) = S_{КСК} E_o \eta_{КСК} \quad (7)$$

где  $\eta_{КСК}$  – общий суммарный КПД комбинированной установки (комбинированного солнечного коллектора).

Отсюда видно, что при увеличении отбираемой мощности от солнечной установки за счет фотоэлектрической составляющей возрастает её суммарный КПД, т.к. площадь и освещенность рабочей поверхности остаются постоянными.

При неполном покрытии приемной поверхности комбинированной установки солнечными элементами формулу (7) необходимо заменить следующей формулой:

$$P_{КСК} = S_{КСК} E_o (\eta_{СК} + f_{КСУ} \eta_{СБ}) \quad (8)$$

где  $f_{КСУ}$  - коэффициент заполнения солнечными элементами приемной поверхности комбинированной установки. В нашем случае он изменяется в пределах от 1/2 до 1/3.

КПД солнечных элементов при нагреве уменьшается по формуле (9):

$$\eta_{СБ} = f_{КСУ} \eta_o (1 - k(T_i - T_o)) \quad (9)$$

где  $\eta_o$  – КПД фотоэлемента при  $T_o = 25$  °С,  $T_i$  – температура нагретого фотоэлемента (считаем её равной температуре жидкости на входе в коллектор), падение КПД солнечного элемента, зависит от температурного градиента  $k$ , и составляет от 0,3 до 0,5 %/°С [5].

С учетом этого формула принимает вид (10):

$$P_{КСК} = S_{КСК} E_o \frac{GC_p (T_{вых} - T_i)}{E_o} + S_{КСК} E_o f_{КСУ} \eta_o (1 - k(T_i - T_o)) \quad (10)$$

По формулам (1-10) можно определить все параметры и характеристики КСУ с учетом тепловой и электрической части.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения экспериментов использовались две солнечные установки равных размеров, с одинаковыми тепловыми абсорберами, расположенными под одинаковыми углами к Солнцу (рис.2). На абсорбере одной установки находились солнечные элементы, длина установок составляла 3 м, а ширина 1 м. Фотоэлектрическая часть установки состояла из трёх фотоэлектрических модулей с одинаковой мощностью. Т.к. площади установок были равны, то обе установки получали одинаковый приход солнечной радиации и находились в одинаковых условиях.



Рис. 2. Тепловая (слева) и теплофотоэлектрическая (справа) солнечные установки

Fig. 2. Thermal (left) and thermal photovoltaic (right) solar installations

При проведении экспериментов была получена сравнительная тепловая выработка двух солнечных установок (рис.3), которая представлена на графике.

Как видно из данных при одновременной выработке тепловой и электрической энергии, температуры теплоносителя на выходе различались

всего на 1-2 градуса, т.е. по выработке тепла установки почти не отличаются. Однако при этом комбинированная термофотоэлектрическая установка вырабатывает электроэнергию. Различия 1-2 градуса при нагреве фиксируются за счет потерь при передаче тепловой энергии от фотоэлементов к абсорберу. Если улучшить качество комбинированного абсорбера, то потери можно практически свести на нет.

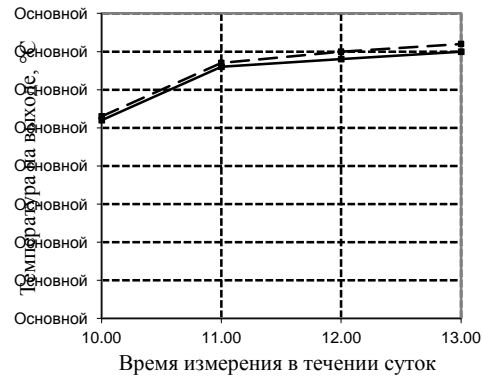


Рис. 3. Температура теплоносителя на выходе --- тепловой гелиофиль, — комбинированный гелиофиль

Fig. 3. The temperature of the coolant at the outlet --- thermal helioprofile, - Combined helioprofile,

На рис. 4 приведены графики удельных тепловых мощностных характеристик ( $Вт/м^2$ ) двух солнечных установок.

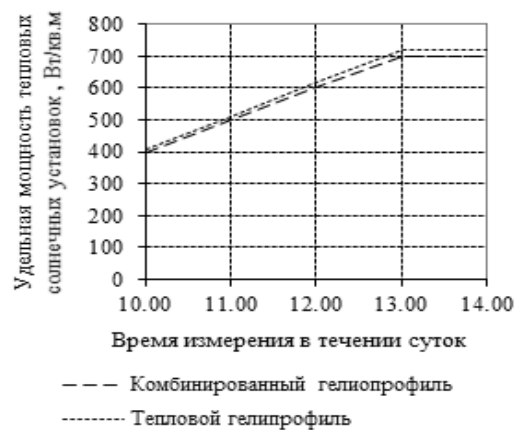


Рис. 4. Сравнительные тепловые мощностные характеристики установок

Fig. 4. Comparative thermal power characteristics of installations

При наличии на гелиофилье работающих фотоэлементов каждая из трех фотоэлектрических батарей вырабатывала до 48 Вт мощности. При этом заполнение фотоэлементами гелиофильа составляло 1/3. Суммарная мощность всех фотоэлектрических модулей составляет 144 Вт. В таблице 1 приведены выходные электрические

характеристики термофотоэлектрической установки.

В результате проведенных исследований становится ясно, что использование нагретого Солнцем теплоносителя и использование электрических элементов существенно увеличивает общий коэффициент преобразования гелиоустановки. В среднем каждая из 3-х батарей комбинированного гелиопрофиля вырабатывает около 50 Вт электрической мощности (табл.1), тепловая же мощность обоих профилей оставалась приблизительно постоянной (рис 4).

**Таблица 1.** Данные нагрузочных характеристик отдельной фотоэлектрической батареи гелиопрофиля

**Table 1.** Data on the load characteristics of a single solar cell helioprofile battery

Характеристики отдельной фотоэлектрической батареи гелиопрофиля											
I (А) – экспериментальное значение	3,5	3,5	3,5	3,5	3,3	3,25	3,2	3,2	3	2,2	0
U (В) – экспериментальное значение	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	19
P (Вт) – экспериментальное значение	0	7	14	21	26,4	32,5	38,4	44,8	48	39,6	0
Характеристики модуля получены при освещенности 960 Вт/м <sup>2</sup> , T <sub>воздуха</sub> =30 °С											

Это происходит из-за того, что фотоэлектрические элементы преобразовывают солнечную радиацию длин волн, отличную от спектра необходимого тепловому коллектору для нагрева воды [6]. При работе солнечных батарей без теплового отвода инфракрасная тепловая составляющая солнечной радиации идет на нагрев фотоэлементов, что часто может приводить к их перегреву и падению КПД фотоэлементов [7].

### ВЫВОДЫ

1. Результаты исследований показали, что с 1 м<sup>2</sup> поверхности разработанного комбинированного гелиопрофиля можно получать до 700 Вт тепловой и около 150 Вт электрической мощности.

2. По результатам экспериментов можно сделать заключение об эффективности работы солнечных установок с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии на предложенные установки получены патенты.

3. Подтверждены, полученные теоретические расчеты по увеличению коэффициента преобразования при сравнении экспериментальных данных, полученных при сравнении работы тепловой и комбинированной установок.

4. Суммарный коэффициент преобразования солнечной энергии установки увеличивается до 85 %. Притом, что тепловой КПД гелиопрофиля

может составлять до 70 %, а электрический КПД солнечных элементов, используемых в исследованиях, составляет более 15%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов К. В. Исследование характеристик солнечного воздушного гибридного коллектора / К. В. Кузнецов, И. И. Тюхов, Э. Д. Сергиевский // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве, Труды 6-й Международной научно-технической конференции, 13-14 мая 2008 г. – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2008. – Ч. 4. – С. 227 - 231.

2. Кувшинов В.В. Пат. 150121 Российская федерация; МПК Н 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии / Кувшинов В. В., Башта А.И., Сафонов В. А.; патентообладатель Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149414/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

3. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).

4. Кувшинов В.В. Методы расчета и повышения эффективности использования теплофотоэлектрических установок / В.В. Кувшинов // Сборник научных трудов СНУЯЭ и П – 2013. – Вып. 3 (47) – С.166 - 172.

5. Арбузов Ю. Д. Основы фотоэлектричества / Ю. Д. Арбузов, В. М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.

6. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун // – М.: Наука, 1985. – 300 с.

7. В.В. Кувшинов, Какушина Е.Г., Чванова Д.А. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей. Энергетические установки и технологии, Том 2, № 1., стр. 3-12, 2016.

8. Кувшинов В.В. “Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности региона” Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017. Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием. стр. 715-718. 2017.

9. Кувшинов В.В. Морозова Н.В., Кузнецов П.Н., Установки для солнечной энергетики, Монография. Москва: Издательство "Спутник+", 2017. 177 с.

10. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки, Москва: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.

11. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.

12. Кувшинов В.В. Пат. 150122 Российская федерация; МПК Н 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии /

Башта А.И., Кувшинов В. В.; патентообладатели  
Башта А.И., Кувшинов В. В. – Заявка  
№ 2014149416/93; заявл. 17.10.2014; опубл.  
27.01.2015, Бюл. № 3.

13. Solar Engineering of Thermal Processes. /  
Duffie J. A., Beckman W. A.: Wiley, 1991.

## REFERENCES

1. Kyznetsov K.V. Investigation of the characteristics of the hybrid solar air collector. *Materialy 6-oi Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of 6-th International scientific-technical conference], Moscow, GNU VIES, Publ., 2008. pp. 227 - 231.

2. Kuvshinov V.V. Photo-thermal converter of solar energy [Photothermalpreobrazovatel solar energy]. *Pat.150121 Russian Federation; MPK H01L31/00/*. Application № 2014149414/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3.

3. Photovoltaic from crystal-crystal-silicon devices. Methods of correcting the measurement results of current-voltage ha-tics (IEC 891-87) GOST 28976-91. Standards Publishing House, 2004, 42 p.

4. Kuvshinov V.V. Methods of calculation and improve the utilization of the heat of photovoltaic installations. [*Sbornik nauchnykh trudov SNUNE&I*]. Sevastopol, SNUNE&I, 2013. No. 3 (47). pp. 166 – 172.

5. Arbuzov U.D. Basics of photovoltaics. Moscow, GNU VIES, Publ., 2007, 292 p.

6. Koltun M.M. *Optika i metrologia solnechnih elementov* [Optics and Metrology of solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 300 p.

7. В.В. Кувшинов, Какушина Е.Г., Чванова Д.А. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей. Энергетические установки и технологии, Том 2, № 1., стр. 3-12, 2016.

8. Кувшинов В.В. “Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности региона” Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017. Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием. стр. 715-718. 2017.

9. Кувшинов В.В. Морозова Н.В., Кузнецов П.Н., Установки для солнечной энергетики, Монография. Москва: Издательство "Спутник+", 2017. 177 с.

10. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки, Москва: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.

11. Rauschenbach G. *Spravochnik po proektirovaniu colnechnix batarei* [Guide for the design of solar panels], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 397 p.

12. Kuvshinov V.V. Photos solar thermal convert energy [Photothermalpreobrazovatel solar energy]. *Pat.150122 Russian Federation; MPK H01L31/00/*. Application № 2014149416/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3.

13. Solar Engineering of Thermal Processes. /  
Duffie J. A., Beckman W. A.: Wiley, 1991.

## HEAT PHOTOELECTRIC INSTALLATION FOR COMBINED DEVELOPMENT OF HEAT AND ELECTRICAL ENERGY

V.V. Kuvshinov, E.A. Bekirov

**Summary** With the development of global technical potential and significant volumes of increase in the production of power plants for solar energy, a new opportunity has emerged to use combined solar systems for the thermo-photoelectric conversion of a stream of incident solar radiation. The Department of Renewable Energy Sources of the Sevastopol State University, the Institute of Nuclear Energy and the Ball Industry has developed and investigated a thermal photovoltaic installation for the combined generation of thermal and electrical energy from a single receiving surface. The proposed installation consists of an absorber of a thermal solar collector, on top of which are monosilicon solar cells. The whole installation is a combined helioprofil, which is mounted in the roof of buildings and structures. This design is intended to increase the power characteristics of solar energy converters. The results of experimental studies showed a significant efficiency of the proposed design, as well as an increase in the total efficiency of the installation, taking into account the efficiency of photoelectric converters and the efficiency of the heat absorber used to heat the coolant. The increase in the overall efficiency of the installation is due to differences in the conversion of solar radiation by the absorber and photocells. If silicon cells convert mainly the ultraviolet and a small part of the short-wave visible radiation, the thermal absorber converts the infrared and long-wave part of the visible radiation. The principle of operation of the installation is as follows: the sun's rays fall on monosilicon photoelectric converters that have a selective coating and absorb up to 95% of the entire incident spectrum, while the photo-elements convert the ultraviolet and short-wave visible solar radiation with a conversion efficiency of about 15-17%, and the rest of the energy goes to heat them, which only impairs their performance and leaves almost 80% of the absorbed spectrum energy unclaimed. Further, the thermal absorber absorbs unclaimed energy during photoelectric conversion and heats up the thermal carrier, which can be used by consumers.

**Subject of study.** Thermal and electrical characteristics of the combined absorber of a thermo photoelectric installation.

**Materials and methods.** In this work, studies of the current model of a thermophotovoltaic installation in natural conditions were carried out, methods were used to directly measure current and voltage values of photoelectric converters with variable load resistance, and also methods to measure the thermal characteristics of the liquid heat carrier.

**Results.** The total conversion coefficient of the incident solar radiation flux at the combined generation of heat and electrical energy has been significantly increased.

**Findings.** According to the results of the experiments, it is possible to make a conclusion about the efficiency of solar installations with a combined generation of heat and electrical energy.

**Key words:** absorber, photoelectric converters, thermal photovoltaic installation, silicon solar cells, helioprofil, thermophotovoltaic conversion of solar energy.



УДК 621.311.1:621.316.1

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Муровский С.П., Сокут Л. Д.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»,  
Физико-технический институт,  
295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4,  
murovski@inbox.ru; cokut36@mail.com

**Аннотация.** В работе рассматриваются перспективные направления модернизации солнечных электростанций Республики Крым, подключенных в общую энергосистему. Проведен расчет по увеличению выработки солнечной электростанцией за счет изменения конфигурации и положения фотобатарей. Разработаны схемы электрических цепей энергоблоков с применением накопителей энергии. Рассчитаны параметры аккумуляторов и схемы их включения в состав энергоблоков.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, модернизация, энергоблок, накопитель энергии, внутренние сети, Республика Крым

### ВВЕДЕНИЕ

Общемировой спрос на энергию, согласно оценкам Международного Энергетического Агентства (МЭА) [1, 2], вырастет к 2040 г на 37%. Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в производстве электроэнергии за приведенный период больше всего вырастет в развитых странах мира, достигнув 37%. Неуклонный рост использования ВИЭ во многих странах к 2040 г повысит их долю в мировом производстве электроэнергии до 30 – 33 % от всей генерации.

В странах Европейского Союза использование энергии ветра достигнет 20% от общего производства электроэнергии, в то время как в Японии использование солнечной энергии в летний период составит 37% от пикового спроса.

Согласно прогнозам, солнечная фотоэлектрическая энергетика (включая затраты на соответствующие накопители энергии (НЭ) может производить 23% мировой электроэнергии к 2040 г и 29% к 2050 г, полностью заменив угольную генерацию и оставив природный газ всего лишь с однопроцентной долей в мировой электроэнергетике [1,2].

Рост использования ВИЭ частично вызван значительным падением цен на оборудование для солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Стоимость установки ВЭС с 2010 по 2015 годы упала на 30%, а стоимость мощных СЭС - в три раза. В результате СЭС и ВЭС составляют основную часть генерирующих источников в электроэнергетике ВИЭ. ВЭС и СЭС входят в объединенную единую энергосистему (ЭС) наряду с традиционными тепловыми электростанциями (ТЭС, АЭС) и ГЭС большой мощности.

### НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ ВИЭ

Можно выделить четыре стадии распространения электростанций с ВИЭ в

зависимости от соотношения мощности электростанций с ВИЭ и невозобновляемых источников (НИЭ), каждая из которых имеет свои специфические характеристики. Для каждой стадии даются соответствующие рекомендации для проектирования, модернизации и эксплуатации ВЭС и СЭС.

На первом этапе интеграции генерация источников энергии с ВИЭ не оказывает заметного влияния на сеть, примерно 3% в годовом производстве электроэнергии, а основную часть составляют электростанции с НИЭ, такие как ТЭС, АЭС, мощные ГЭС. Нестабильная генерация ВЭС и СЭС «классифицируется» здесь просто как ежедневные и «естественные» изменения спроса на электроэнергию. К странам, которые в настоящее время находятся на этом этапе, относятся Индонезия, Южная Африка, Мексика.

На второй стадии интеграции генерация источников энергии с ВИЭ уже начинают серьезно влиять на систему, доля ВИЭ в годовой генерации составляет от 3% до 15%, но такое влияние регулируется относительно просто путем усовершенствования некоторых практических методов управления электроэнергетическим сетевым хозяйством, например, с помощью умного прогнозирования выработки ВЭС и СЭС. На данной стадии находятся Чили, Китай, Бразилия, Индия, Новая Зеландия, Австралия, Нидерланды, Швеция, Австрия, Бельгию.

На третьем этапе доля электростанций с ВИЭ составляет от 15% до 25%, при этом возникают существенные вызовы для энергосистемы в плане интеграции нестабильных ВИЭ. Их влияние ощущается как на уровне системы в целом, так и на практике работы электростанций с НИЭ, в первую очередь, ТЭС. Здесь на первое место выходит гибкость энергосистемы – её способность реагировать на неопределенность и изменчивость баланса спроса и предложения. Два главных гибких ресурса этой стадии: управляемые (маневренные) электростанции и сеть, но уже начинает повышаться значение управления спросом и новых технологий

накопления энергии. На нынешний день на данном этапе находятся Италия, Великобритания, Греция, Испания, Португалия и Германия.

На четвертой стадии с долей нестабильной генерации ВИЭ в 25 - 50% годовой выработки и с её кратковременными повышениями до 100% суточного потребления вызовы носят высокотехнологический характер. На четвертой стадии требуется еще большая гибкость системы, её способность к самовосстановлению после резких и объемных колебаний выработки энергии. На этой стадии развития ЭС находятся Ирландия и Дания. На этой стадии требуется применение НЭ, в частности, химических аккумуляторов.

В последние 5 лет во внутренней сети СЭС широко применяются различные накопители энергии. Увеличение мощности ВИЭ, в частности, расширяющееся применение СЭС в электроэнергетических системах (ЭЭС) во всем мире, планы предстоящего роста мощности СЭС в

предстоящие 10 - 20 лет привело к значительному производству мощных НЭ.

Случайный характер солнечного излучения (СИ) и трудность устойчивого прогнозирования и устойчивого обеспечения производства электроэнергии СЭС, значительные суточные, квартальные и годовые колебания интенсивности СИ, зависимость выработки электроэнергии от метеоусловий на площадке СЭС, непредсказуемость текущей выработки электроэнергии и невозможность ее точного планирования на требуемый срок по условиям выполнения СГПН приводят к реально невозможной эксплуатации СЭС без НЭ, обеспечивающих выработку электроэнергии хотя бы на период от 2 до 6 часов [3, 4].

Для примера на рис. 1 приведено фото СЭС на острове Кауаи (Kauai) Гавайского архипелага с блоками НЭ общей емкостью 52 МВт·ч[4].



**Рис. 1.** Внешний вид СЭС на острове Кауаи (Kauai) Гавайского архипелага. На переднем плане - блоки НЭ общей ёмкостью 52 МВт·ч

**Fig. 1.** Appearance of SES on the island of Kauai of the Hawaiian archipelago. In the foreground are NE blocks with a total capacity of 52 MWh

НЭ выполняют ряд функций: выравнивание графиков нагрузки в ЭС (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной энергии и выдачу в сеть в периоды дефицита);

- обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов, собственных нужд электростанций и подстанций;

- демпфирование колебаний мощности, стабилизация работы малоинерционных децентрализованных источников электрической энергии;

- обеспечение бесперебойной выработки электроэнергии ВЭС и СЭС.

В связи с развитием СЭС в Республике Крым (РК), ЭС в РК можно отнести к третьей стадии интеграции источников энергии с ВИЭ. В таблице 1 приведён перечень генерирующих мощностей в схеме электроснабжения РК и приведено соотношение установленной мощности электростанций с ВИЭ по отношению к общей установленной мощности электростанций.

**Таблица 1.** Величины генерирующих мощностей в схеме электроснабжения Республики Крым**Table 1.** The values of generating capacities in the power supply circuit Republic of Crimea

№ п/п	Наименование электростанции	Установленная мощность, МВт
1	Таврическая (Симферопольская) ПГУ-ТЭС	470
2	Балаклавская (Севастопольская) ПГУ-ТЭС	470
3	Симферопольская ТЭЦ	100
4	Севастопольская ТЭЦ	33
5	Мобильные ГТЭЦ	22x10
6	Сакская ТЭЦ	120
7	Камыш-Бурунская ТЭЦ	30
Итого традиционных электростанций		1443
1	Тарханкутская ВЭС	15,9
2	Сакская ВЭС	19
3	Останинская ВЭС	25
4	Донузлавская ВЭС	10,9
5	Судакская ВЭС	6,3
6	Пресноводненская ВЭС	6
7	Восточно-Крымская ВЭС	2,8
Итого ветровых электростанций		85,9
1	Перовская СЭС	105,56
2	Охотниковская СЭС	82,65
3	Николаевская СЭС	69,7
4	Митяевская СЭС	31,55
5	Родниковая СЭС	7,5
Итого солнечных электростанций		296,96
Итого электростанций с ВИЭ		382,86
Итого всех электростанций		1825,86
Процент электростанций с ВИЭ		21%

## ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Целью работы является определение перспективных направлений модернизации действующих солнечных электростанций на территории Республики Крым и повышение надежности поставки электроэнергии в единую систему электроснабжения полуострова.

СЭС в РК проектировались и сооружались в начале 2001-2005 гг. и эксплуатируются уже свыше 10 лет. В настоящее время актуальными задачами являются как проектирование и сооружение новых СЭС, так и модернизация существующих.

Чтобы представить возможности модернизации СЭС с точки зрения увеличения их установленной мощности, выработки общего объема электроэнергии, повышения стабильности выработки, повышения удельных показателей (кВт/км<sup>2</sup>) при размещении оборудования на площадке СЭС и т.п., необходимо рассмотреть расчетные соотношения параметров СЭС.

Мощность СЭС определяется вероятностными характеристиками первичного энергоносителя – солнечного излучения и имеет ряд особенностей.

Установленная электрическая мощность, как СЭС, так и отдельных энергоблоков (ЭБ) с фотопанелями (ФЭП), меньше в десятки раз по сравнению с ЭБ традиционных тепловых

электростанций с гарантированной мощностью. ЭБ занимают обширные территории под открытым небом, не имеют ограждения. СИ характеризуется значительными суточными, квартальными и годовыми колебания интенсивности.

### ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ И СХЕМ ВНУТРЕННИХ СЕТЕЙ СЭС

Значительные отличия от традиционных электростанций имеет внутренняя электрическая схема трехфазных сетей СЭС. В составе СЭС имеются силовые электрические сети постоянного тока ФЭП и трехфазные сети переменного тока для передачи в энергосистему мощности отдельных ЭБ. Номинальное линейное напряжение ЭБ имеет относительно низкую величину – 1,0 кВ. Поэтому схема объединения мощности СЭС для выдачи в существующую традиционную высоковольтную сеть выполняется двухуровневой или трехуровневой, с несколькими ступенями трансформации. На территории СЭС не используются воздушные линии электропередачи. Все внутренние сети СЭС выполняются кабельными линиями.

При выборе направления модернизации оборудования и схемы внутренней сети СЭС необходимо оценить факторы влияющие:

- на фактическую мощность,  $R_{\text{ФАК СЭС}}$  и реальную выработку электроэнергии,  $W_{\text{РЕАЛ}}$ ;
- на удельный показатель, кВт/км<sup>2</sup> при размещении площадки СЭС;
- на стоимость и окупаемость СЭС.

В работе рассмотрены три варианта мощности ФБ -150 Вт, 200 Вт; 250 Вт и сделана оценка влияния на  $R_{\text{ФАК СЭС}}$  и  $W_{\text{РЕАЛ}}$ . Рассмотрена различная компоновки ФЭП по количеству и размещению ФБ (рассмотрено два варианта – 16 и 20 ФБ в составе ФЭП). Проведена оценка параметров в зависимости от различных углов наклона ФЭП,  $\beta$  при размещении на площадке СЭС, рассмотрены несколько вариантов угла наклона установки ФЭП,  $\beta$  по отношению к широте местности,  $\varphi$  площадки СЭС. Определены расстояния между панелями ФЭП на площадке СЭС и степень их взаимного затенения,  $\alpha$  (рассмотрено два варианта размещения).

В ходе модернизации оборудования СЭС изменение углов наклона ФЭП,  $\beta$  при размещении на площадке СЭС представляет наиболее простую и при этом весьма эффективную задачу увеличения фактической мощности  $R_{\text{ФАК СЭС}}$  и реальной выработки электроэнергии  $W_{\text{РЕАЛ}}$ .

При проектировании СЭС среднесуточная мощность результирующего СИ на наклонной поверхности ФЭП  $\bar{E}_{Hji}$  (Вт/м<sup>2</sup>) для ФЭП по кварталам года рассчитывается на основе среднесуточной удельной мощности,  $E_i$  (Вт/м<sup>2</sup>) за квартал по данным метеонаблюдений [5]:

- широта местности  $\varphi$ ;
- данные метеонаблюдений по интенсивности суммарного среднесуточного СИ на горизонтальную поверхность,  $E_i$  (Вт/м<sup>2</sup>);
- среднее количество ясных солнечных дней в году,  $\bar{d}_{ji}$ ;

- среднее число часов СИ,  $\bar{h}_{ji}$  для заданной широты местности,  $\varphi$ ;
- характеристики установки ФЭП – азимут,  $A_K$  и угол наклона,  $\beta$  ФЭП к горизонтальной поверхности, коэффициент затенения,  $\alpha$ .

Результатом расчета по принятым исходным данным являются значения  $\bar{E}_{Hji}$  на наклонной поверхности ФЭП. Значения среднесуточной мощности результирующего солнечного излучения  $\bar{E}_{ji}$  для каждого квартала определяются по формуле (1):

$$\bar{E}_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^3 E_i}{3}, \quad (1)$$

где:  $i$  - порядковый номер месяца;  $j = 1, 2, 3, 4$  - порядковый номер квартала.

Значения  $\bar{E}_{Hji}$  определяются по формулам (2, 3):

$$\bar{E}_{Hji} = R \cdot K_A \cdot \bar{E}_{ji}, \quad (2)$$

$$R = (1 - \varepsilon) \cdot R_b + \varepsilon \cdot \left[ \frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + \rho \cdot \left[ \frac{1 - \cos \beta}{2} \right], \quad (3)$$

где:  $R$  – коэффициент, учитывающий изменение  $\bar{E}_{ji}$  на наклонной поверхности;

$K_A$  – коэффициент, зависящий от азимута  $A_K$ , (при  $A_K = 0$ ,  $K_A = 1$ ; при  $A_K = \pm 10^\circ$ ,  $K_A = 0,99$ ; при  $A_K = \pm 15^\circ$ ,  $K_A = 0,98$ );

- $\varepsilon$  – отношение рассеянного СИ к суммарному;
- $\rho$  – отражательная способность земли для СИ;

$R_b$  – коэффициент, характеризующий в среднем пропускающую способность атмосферы;

$\beta$  – угол наклона ФЭП к площади площадки.

Если принять значение  $\bar{E}_{ji}$  для горизонтальной поверхности ( $\beta = 0$ ) за единицу, то при  $\beta = \varphi$  значения  $\bar{E}_{Hji}$  составят 1,21, при  $\beta = (\varphi - \delta)$ , где  $\delta$  - средний угол склонения, значения  $\bar{E}_{Hji}$  составят 1,27, при точной ориентации поверхности ФЭП перпендикулярно потоку СИ значения  $\bar{E}_{Hji}$  составят 1,56. Увеличение  $\bar{E}_{Hji}$  при изменении угла наклона  $\beta$  столь значительно, что в конструкции ФЭП некоторых СЭС предусматриваются устройства регулирования угла поворота ФЭП с целью слежения за солнцем (рис. 2).



**Рис. 2.** Фото панелей в составе СЭС «Star», США, 2015 г, мощностью 579 МВт (на 20% ФЭП предусмотрены устройства регулирования угла поворота с целью слежения за солнцем)

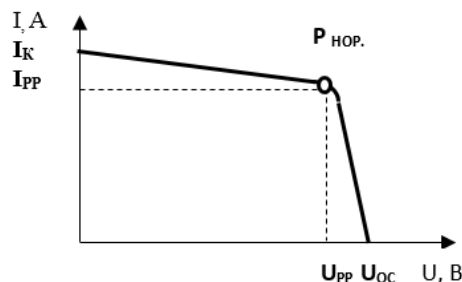
**Fig. 2.** Photo of panels as part of Star SES, USA, 2015, with a capacity of 579 MW (devices for adjusting the angle of rotation for tracking the sun are provided for 20% of the solar cells)

Значения  $\bar{E}_{H\ ji}$  определяют в дальнейшем при проектировании СЭС мощностную характеристику ФБ  $P_{j\ \Phi Б} = f(\bar{E}_{H\ ji})$ , фактическую мощность  $P_{\text{ФАКИ}}$  реальную выработку электроэнергии  $W_{\text{РЕАЛ}}$  СЭС.

Следующим этапом модернизация СЭС может выполняться путем замены ФБ в составе ФЭП в связи улучшением их характеристик (мощности, КПД, массо-габаритных параметров) по сравнению с исходными, принятыми ранее. Для определения характеристик ФБ на площадке части СЭС необходимы паспортные данные ФБ и значения среднесуточной мощности результирующего СИ  $\bar{E}_{H\ ji}$  на наклонной поверхности. Нормированные

параметры ФБ указываются при следующих условиях: атмосферное давление 1 атм, температура окружающей среды 25°C, интенсивность суммарного СИ  $E_{i0} = 1000$  Вт/м<sup>2</sup> или 800 Вт/м<sup>2</sup>. Электрические параметры ФБ приводятся в соответствии с типовой вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (рис.3).

Рассмотрено три варианта мощности ФБ -150 Вт, 200 Вт; 250 Вт с разными значениями параметров и выявлено влияние параметров ФБ на фактическую мощность  $P_{\text{ФАКИ}}$  реальную выработку электроэнергии  $W_{\text{РЕАЛ}}$  для оценки возможности модернизации СЭС. Полученные значения приведены в таблице 2.



**Рис. 3.** Типовая ВАХ солнечной батареи:  $P_{\text{НОР.}}$  – максимальная нормированная мощность, Вт;  $U_{\text{PP}}$  – напряжение в точке максимальной мощности, В;  $I_{\text{PP}}$  – сила тока в точке максимальной мощности, А;  $U_{0\text{C}}$  – напряжение холостого хода при включении, В;  $I_{\text{K}}$  – ток короткого замыкания, А

**Fig. 3.** Typical CVC of the solar battery:  $P_{\text{NOR.}}$  - maximum rated power, W;  $U_{\text{PP}}$  - voltage at the point of maximum power, V;  $I_{\text{PP}}$  - current strength at the point of maximum power, A;  $U_{0\text{C}}$  - open circuit voltage at switching on, V;  $I_{\text{K}}$  - short circuit current, A

**Таблица 2.** Параметры фотосолнечных батарей и энергоблоков[5]

**Table 2.** Parameters of photo-solar batteries and power units [5]

№п/п	Параметры	ФБ1	ФБ2	ФБ3
1	Интенсивность суммарного СИ, Е, Вт/м <sup>2</sup>	1000		
2	$P_{\text{НОР.}}$ , Вт	150	200	250
3	$U_{\text{PP}}$ , В	18	37,2	30,0
4	$I_{\text{PP}}$ , А	8,29	5,38	8,33
6	$I_{\text{K}}$ , А	8,75	5,82	8,89
7	$\eta$ , %	17,46	18,1	17,5
8	Размер (Д x Ш x Г), мм	1480x680 x 30	1580x808x35	1640x992x40
9	Масса, кг	12,5	15	18
10	Реализуемая мощность ФЭП, Р <sub>ФБ</sub> , Вт	35,2-112,0	47,0-149,2	51,0-186,5

Продолжение таблицы 2

Continuation of table 2

11	Реализуемая выработка энергии $W_{\text{ФБ}}$ , Вт·ч/год	201700,2	268933,6	336167
12	Число ФБ в ФЭП	16		
13	Напряжение ФЭП $U_{\text{п}}$ , В	72	148	120
14	Сила тока ФЭП $I_{\text{п}}$ , А	33,16	21,52	33,32
15	Мощность ФЭП $P_{\text{п}}$ , Вт	2400	3200	4000
16	Размеры ФЭП (Д x Ш), м	6,5x3,0	6,9x3,5	7,2x4,4
17	Масса ФЭП, кг	220	264	316,8
18	КИУМ по месяцам	0,02-0,224	0,026-0,225	0,026-0,225
19	КИУМ в среднем за год	0,123	0,15	0,15

Как следует из анализа параметров ФБ и ФЭП (таблица 2) при увеличении нормируемой мощности ФБ в 1,33 раза, реализуемая мощность ФБ в рассматриваемых условиях размещения СЭС ( $\varphi = 45^\circ$  с.ш., при  $\beta = \varphi$ ) и выработка энергии ФЭП за год - возрастают в таком же соотношении, а КИУМ увеличивается 1,2. Аналогично, при увеличении нормируемой мощности ФБ в 1,67 раза, реализуемая мощность ФБ и выработка энергии ФЭП за год - возрастают в таком же соотношении, а КИУМ практически не меняется.

Увеличение площади панели ФЭП составляет, при замене тех же ФБ, соответственно - 1,24 и 1,64. Увеличение площади СЭС составляет - 1,06 и 1,11. Преимущество получается по удельному показателю ( $\text{кВт}/\text{км}^2$ ) – соответственно - 1,17 и 1,48.

Очевидно, что увеличение выработки электроэнергии СЭС почти в 1,7 раза может быть эффективно, но для оценки модернизации ФБ в

существующей СЭС требуется технико-экономический анализ. При проектировании новых СЭС применению более мощных ФБ следует отдавать предпочтение.

Следующим направлением модернизации СЭС может стать изменение удельного показателя ( $\text{кВт}/\text{км}^2$ ) за счет изменения расстояний между панелями ФЭП на площадке СЭС и соответственно, степени их взаимного затенения  $\alpha$ . Применяется два основных варианта размещения платформы ФЭП на поверхности земли (рис. 4): платформа имеет четыре точки опоры и устанавливается неподвижно на относительно небольшой высоте  $H$  (до 0,5 м) относительно земли (рис. 4, а) и платформа устанавливается на одной стойке высотой до 2,5 м с возможностью, в общем случае, регулировать угол наклона  $\beta$  (рис. 4, б).

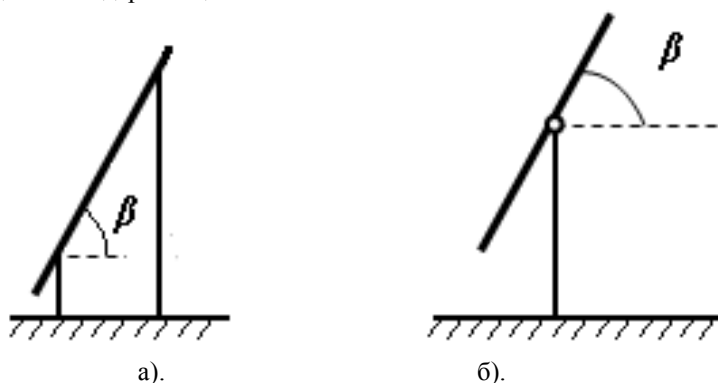
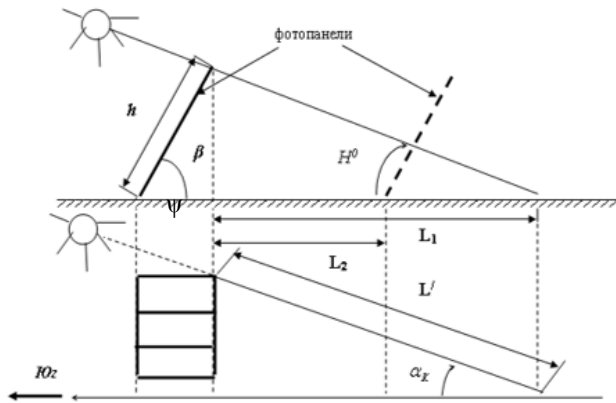


Рис. 4. Примеры установки платформы ФЭП с СБ на поверхности земли

Fig. 4. Examples of installing a solar cell with a solar cell on the surface of the earth

Обычно в составе ФЭП объединяется 16-20 СБ для удобства монтажа и установки платформ ФЭП на площадке части СЭС, а также для получения необходимых выходных параметров: тока и напряжения ФЭП.

Порядок и схема расчета степени затенения  $\alpha$  поясняются рис.5. Штриховой линией на рис. 5 показано размещение ФЭП с затенением, на расстоянии  $L_2$  меньше  $L_1$  (где  $L_1$  – размещение ФЭП без затенения).



**Рис. 5.**Схема расположения ФЭП для расчета степени затенения  $\alpha$  :  
вверху - вид сбоку; внизу – вид сверху

**Fig. 5.** The layout of the solar cells to calculate the degree of shading  $\alpha$  :  
top - side view; below - top view

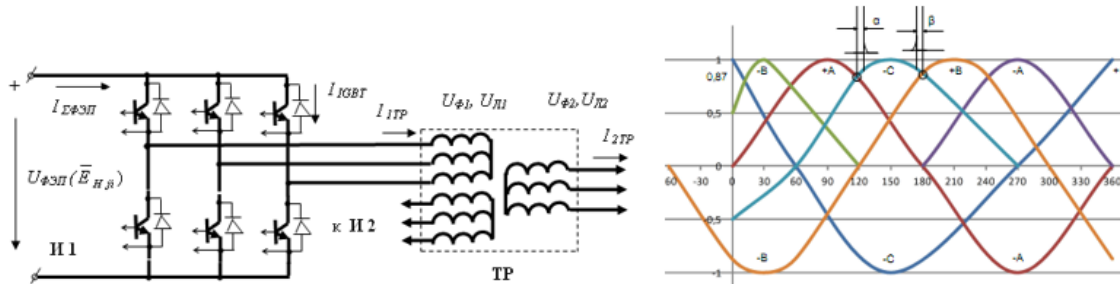
Анализируя мощность СИ, можно оценить длину тени  $L$  (рис. 5) для четырех характерных точек – летнего (зимнего) солнцестояния и весеннего (осеннего) равноденствия. Максимальная величина затенения соответствует утренним часам в день зимнего солнцестояния, минимальное затенение – полдню в день летнего солнцестояния.

Модернизация СЭС может выполняться путем включения накопителей энергии в составе ЭБ. Схема ЭБ СЭС содержит цепь преобразования напряжения постоянного тока ФБ в стандартный вид для ЭС по числу фаз, частоте тока и величине напряжения. Для этой цели в ЭБ применяется трехфазный мостовой инвертор с выходным разделительным ТР, вторичное (выходное для сети) напряжение которого  $U_{Л2}$  должно соответствовать

стандартной величине линейного напряжения внутренней сети СЭС [6,7].

Главным элементом цепи преобразования является трехфазный мостовой полупроводниковый преобразователь (ПП), который, в зависимости от угла управляющего сигнала может работать как в режиме управляемого выпрямителя (УВ), так и в режиме трехфазного инвертора (И) - рис.6.

Параметры УВи И можнорегулировать в широком диапазоне при изменении угла управления  $\alpha$  для УВ и угла управления  $\beta$  для И. Для УВ угол управления  $\alpha$  отсчитывается вправо от точки естественной коммутации, для И угол управления  $\beta$  отсчитывается влево от точки естественной коммутации – рис.6.

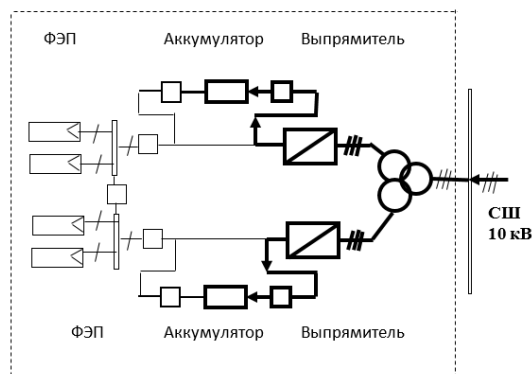


**Рис. 6.** Схема полупроводникового преобразователя и схема отсчета углов управления  $\alpha$  управляемого выпрямителя и  $\beta$  инвертора в составе трехфазного полупроводникового преобразователя

**Fig. 6.** Scheme of the semiconductor converter and the reference frame of the control angles  $\alpha$  of the controlled rectifier and  $\beta$  inverter as part of a three-phase semiconductor converter

Расчет параметров НЭ в составе внутренней цепи ЭБ СЭС по предложенным далее схемам включения АК на заряд и разряд (рис.7, 8) выполнен для мощности ЭБ -  $P = 2,0$  МВт. Рассматриваются варианты включения АК и режимы заряда – разряда АК применительно к электрической цепи одного

ЭБ, так как вся внутренняя схема СЭС состоит из однотипных ЭБ.Электрическая схема ЭБ с АК в режиме зарядки АК в ночное время при избытке энергии в сети приведена на рис.7[8, 9].

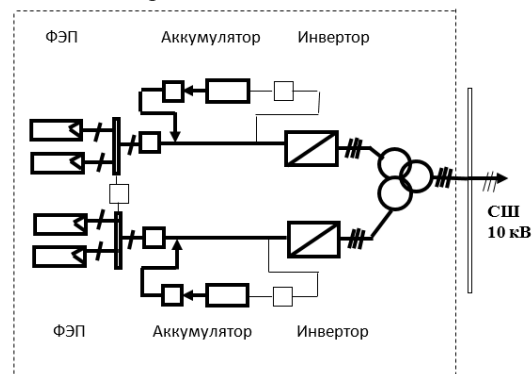


**Рис. 7.** Схема блока ЭБ с подключением АК. Жирным контуром обозначены цепи в режиме заряда АК от сети 10 кВ в ночное время

**Fig. 7.** Scheme of the EC unit with AK connection. Bold circuits indicate circuits in the mode of charging the AC from a 10 kV network at night

При разряде АК параллельно с ФЭП (рис.8) поддерживается надежная работа СЭС в дневное время при колебаниях СИ. В часы вечернего

максимума нагрузки запасенная в АК энергия обеспечивает работу СЭС при отсутствии СИ.



**Рис. 8.** Схема ЭБ с подключением АК. Жирным контуром обозначены цепи в стандартном режиме работы инверторов от ФЭП при наличии СИ и подключении АК на разряд

**Fig. 8.** Electronic circuit with AK connection. Bold circuits indicate the circuits in the standard mode of operation of inverters from the photomultiplier tubes in the presence of SI and connecting the AK to discharge

Для расчета накопителей выбираем литий-ионные АК как наиболее эффективные аккумуляторы на сегодняшний день, с техническими характеристиками, представленными в таблице 3[10].

**Таблица 3.** Технические характеристики литий-ионных АК

**Table 3.** Technical characteristics of lithium-ion batteries

Параметры	Значения	Характеристика
Мощность	1,86 МВт·ч	Накопитель большой емкости «под ключ» для систем резервного электропитания, ветро- и солнечной энергетики, магистральных электросетей
	1,11 МВт·ч	
Номинальное напряжение	620 В	
Диапазон напряжения	505 – 705 В	
Мощность	1,6 МВт·ч	1600 KWH ENERGY STORAGE Система накопления энергии на базе литий-ионных батарей Винстон для резервного питания крупных объектов
	0,6 МВт·ч	600 KWH ENERGY STORAGE Система накопления энергии на базе литий-ионных батарей Винстон для резервного питания крупных объектов
Номинальное напряжение	620 В	
Диапазон напряжения	505 – 705 В	
Рабочая температура	От -25°С до + 60°С	

Выпрямленное напряжение на выходе УВ в схемах заряда АК в обоих ЭБ (рис.7, 8) принимается неизменным и равным значению  $U_B$ . Необходимо учесть, что разряд элементов АК не должен превышать 80%, поэтому необходимо задать значение глубины разряда батареи  $\beta = 0,8$ . Также на параметры АК влияет температура окружающей среды. При понижении температуры емкость батареи снижается. Поэтому введен коэффициент  $\alpha$ , учитывающий уменьшение емкости при понижении

температуры окружающей среды. При средней температуре внутри помещения шкафа ЭБ, где предполагается установить АК, равной  $10^\circ\text{C}$ , коэффициент  $\alpha$  примем равным 0,95.

При расчете количества АК в составе НЭ для примера примем среднее значение времени разряда АК – 4 часа. Для достижения необходимого заряда необходимо соединить параллельно выбранные из таблицы 3 типы АК. Результаты расчета представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Параметры АК в составе накопителей энергии

**Table 4.** AC parameters as part of energy storage devices

Блок	Количество НЭ	Параметры	Значения
ЭБ СЭС	2	$Q_{\text{ПОТР}} = nI_B$	6660 А·ч
		$q_0$ для АК НЭ 1,86 МВт	3100 А·ч
		$N_{\text{ПАРАЛ. АК}}$	2
		Всего АК в ЭБ	4

По результатам расчета получаем 4 АК емкостью по 6660 А·ч каждый и номинальным напряжением 620 В.

## ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ развития электростанций на базе СЭС и внедрения их в общую энергосистему. Рассмотрены перспективные направления модернизации солнечных электростанций Республики Крым. Общим при модернизации действующих СЭС можно выделить: увеличение мощности станций в целом, увеличение мощности единичных энергоблоков СЭС, применение накопителей энергии, в частности, литий-ионных аккумуляторов. Рассчитаны параметры и характеристики энергоблоков СЭС с учетом усовершенствования применяемого оборудования. Разработаны схемы электрических цепей энергоблоков с применением накопителей энергии. Рассчитаны параметры аккумуляторов и схемы их включения в составе энергоблоков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Электронный ресурс. Режим доступа: // [http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy\\_gazvitiya\\_mirovoj\\_elektroenergetiki\\_1/](http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy_gazvitiya_mirovoj_elektroenergetiki_1/) Перспективы развития мировой электроэнергетики до 2035 года.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: // <http://uabio.org/img/files/docs/uabio-position-paper-13/> Анализ энергетических стратегий стран ЕС и мира.
3. Лесик В.П. Общая характеристика и параметры мощных солнечных электростанций / В.П. Лесик, Л.Д. Сокут // Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017» (Севастополь, 08.2017г.) Под

редакцией: Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик/ Севастополь: СевГУ, 2017. - С. 763-769.

4. Сокут Л.Д. Возможности повышения эффективности солнечных электростанций в объединенной электрической сети за счет применения накопителей энергии [Текст] / Л.Д. Сокут, А.С. Муровская, А.Н. Курзо // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (Пермь, 08.02.2017 г.). - В 2 ч. Ч.1 / Уфа: Омега сайнс, 2017. - С.70-73.

5. Бекиров Э.А. Основные этапы расчета параметров солнечной электростанции / Э.А. Бекиров, Л.Д. Сокут // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». - 2013.- № 17 (139).- С. 29-35.

6. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр: ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

7. Сокут Л.Д. Моделирование универсального полупроводникового преобразователя в цепи электрических машин средней и большой мощности / Л.Д. Сокут, С.П. Муровский, Н.М. Акулиничев // Строительство и техногенная безопасность. - 2018.- № 11 (63).- С. 129-135.

8. Сокут Л.Д. Перспективы развития систем электроснабжения за счет подключения ветровых и солнечных электростанций с накопителями энергии в общую энергосистему / Л.Д. Сокут, А.С. Муровская // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - № 7 (59). - С. 113-121.

9. Муровский С.П. Расчет параметров накопителей энергии для солнечных электростанций при включении их в объединенную энергосеть / С.П. Муровский, Л.Д. Сокут, В.П. Лесик

// Журнал «Электрооборудование: эксплуатация и ремонт».- М.: Панорама.- 2017.- №12.- С.46-49.

10. Сокут Л.Д.Аккумуляирование энергии для солнечной электростанции/Сокут Л.Д.// Инновации в сельском хозяйстве.- 2017.- № 1 (22).- С. 154-162.

## PERSPECTIVE DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF SOLAR POWER PLANTS OF THE REPUBLIC OF CRIMEA

Murovskiy S.P.,Sokut L.D.

**Summary** The paper discusses promising areas of modernization of solar power plants of the Republic of Crimea, connected to the General power system. The calculation of the increase in the production of solar power by changing the configuration and position of photovoltaic cells. Schemes of electric circuits of power units with the use of energy storage devices have been developed. Parameters of accumulators and schemes of their inclusion in structure of power units are calculated.

**Key words:**solar power plant, modernization, power unit, energy storage, internal networks, Republic of Crimea

## ОБЩИЙ ПОДХОД К ПОЛИЛИНЕЙНЫМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И АППРОКСИМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ МНОГООБРАЗИЙ

Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Крысько А.А.

<sup>1</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2  
e.v.konopatskiy@mail.ru

<sup>2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65  
rotkov@nngasu.ru

**Аннотация.** В работе предложен общий подход к геометрическому моделированию многопараметрических линейчатых многообразий с последующим их аналитическим описанием в БН-исчислении. Такой подход является частным случаем геометрического моделирования многопараметрических многообразий, проходящих через наперёд заданные точки. Если координаты исходных точек будут соответствовать некоторой экспериментально-статистической информации, то полученный геометрический объект будет отражением модели многофакторного процесса, полученного с помощью многомерной интерполяции. Отличительной особенностью такого подхода является выполнение условия прохождения моделируемого геометрического объекта через наперёд заданные точки, что позволяет сразу получить требуемый результат без необходимости составления и решения сложных систем алгебраических уравнений. При этом использование линейчатых многообразий, полученных на основе линейной зависимости параметров, которые являются инвариантом параллельного проецирования, в силу своей простоты и легкости вычислений является во многих случаях более предпочтительными, по отношению к другим возможным моделям исследуемого процесса или явления. А использование плана регулярной многомерной сети узловых точек в форме  $n$ -мерного обобщения прямоугольника, позволяет легко перейти от системы параметрических уравнений к уравнению модели в явном виде. Кроме того полученные линейчатые многообразия могут использоваться для геометрического моделирования многофакторных процессов и явлений путём многомерной аппроксимации исходного множества точек или, по аналогии с многомерной интерполяцией, некоторых экспериментально-статистических данных. Так приведенный в работе пример геометрического моделирования зависимости температуры внутренней поверхности наружного ограждения от трёх факторов и его результаты, подтверждают эффективность прикладного использования предложенного подхода к моделированию многофакторных процессов и явлений с помощью многомерных интерполяции и аппроксимации на основе линейчатых многообразий.

**Ключевые слова:** линейчатые многообразия, полилинейная интерполяция, полилинейная аппроксимация, геометрическое моделирование, многофакторный процесс, БН-исчисление.

**ВВЕДЕНИЕ**

Большинство из существующих способов математического моделирования сводится одному из двух групп методов: интерполяция и аппроксимация. При этом наиболее простыми моделями, и потому во многих случаях наиболее предпочтительными, являются линейные. На данный момент существует общий подход к созданию моделей на основе полилинейной интерполяции, основанный на решении СЛАУ, полученной на основе выбранного интерполянта. Такой подход имеет ряд ограничений, поскольку с

ростом количества исследуемых факторов, от которых зависит функция отклика, растёт количество уравнений СЛАУ. Так для определения коэффициентов трилинейного интерполянта функции трёх переменных необходимо решить систему 8-ми линейных уравнений. Предложенный в работах [1-5] общий подход к созданию моделей многофакторных процессов и явлений с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации позволяет сразу получить точечное уравнение модели искомого процесса, исключая необходимость решения СЛАУ. Он заключается в том, что моделируемый процесс представляется

геометрическим параметризованным объектом многомерного аффинного пространства, проходящим через наперёд заданные точки, соответствующие исходной экспериментально-статистической информации в случае многомерной интерполяции или максимально приближенной к исходным данным в случае многомерной аппроксимации. Основу предложенного подхода составляют многопараметрические многообразия, проходящие через наперёд заданные точки и принадлежащие многомерному аффинному пространству, для построения которых используются дуги алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки [6]. Аналитическое описание таких многообразий и соответствующих им моделей процессов и явлений выполнено с помощью математического аппарата БН-исчисления (другое название «Точечное исчисление Балубы-Найдыша» [7-9]), основанного на инвариантах аффинной геометрии, одним из которых является простое отношение трёх точек прямой, которое представляет собой линейную зависимость между точками, установленную посредством текущего параметра. Однако построение линейчатых многообразий с использованием простого отношения трёх точек прямой в БН-исчислении и его практическое приложение к моделированию линейных многофакторных процессов и явлений ранее рассмотрены не были.

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И  
АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ  
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ  
ЛИНЕЙЧАТЫХ МНОГООБРАЗИЙ В БН-  
ИСЧИСЛЕНИИ**

В соответствии с изложенной выше концепцией моделирования многофакторных процессов и явлений, геометрической моделью любого полилинейного многофакторного процесса будем считать многопараметрический линейчатый геометрический объект, принадлежащий многомерному пространству и проходящий через наперёд заданные точки, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации. Самым простым из геометрических объектов, относящихся к линейчатым многообразиям, является отрезок прямой, проходящей через 2 точки, точечное уравнение которого имеет следующий вид:

$$N_A = A_1\bar{u} + A_2u, \tag{1}$$

где  $N_A$  – текущая точка прямой  $A_1A_2$ , которая своим движением заполняет пространство, формируя тем самым отрезок прямой;

$A_1$  – начальная точка отрезка прямой;

$A_2$  – конечная точка отрезка прямой;

$0 \leq u \leq 1$  – текущий параметр, обеспечивающий движение текущей точки  $N_A$  по прямой  $A_1A_2$ ;

$\bar{u} = 1 - u$  – дополнение текущего параметра  $u$  до 1.

Следует отметить, что при значении параметра  $u = 0$  будем иметь начальную точку  $A_1$ , а при  $u = 1$  – конечную  $A_2$ . Соответственно изменение параметра  $0 \leq u \leq 1$  формирует отрезок  $A_1A_2$ . При изменении параметра  $-\infty < u < +\infty$ , получим бесконечную прямую.

Уравнение (1) представляет собой не что иное как простое отношение трёх точек прямой и после простых преобразований может быть сведено к следующему виду:

$$\frac{N_A - A_1}{A_2 - A_1} = u \Leftrightarrow \frac{N_A A_1}{A_2 A_1} = -N_A A_2 A_1 = u,$$

где  $N_A A_2 A_1$  – простое отношение трёх точек  $N_A$ ,  $A_2$  и  $A_1$  прямой  $A_1A_2$ .

Следует отметить, что точечные уравнения представляются в символьной форме, которая в результате сводится к параметрической. Т.е. любой точечное уравнение можно представить в виде системы однотипных по отношению к параметру параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x_{N_A} = x_{A_1}\bar{u} + x_{A_2}u \\ y_{N_A} = y_{A_1}\bar{u} + y_{A_2}u \\ z_{N_A} = z_{A_1}\bar{u} + z_{A_2}u \\ \dots\dots\dots \end{cases}$$

При этом количество параметрических уравнений в системе напрямую зависит от размерности пространства и ограничивается только необходимостью аналитического описания моделируемого процесса или явления. Аналогичным образом любое точечное уравнение можно свести к системе параметрических уравнений. Геометрически этот процесс представляет собой определение проекций на оси глобальной системы координат и получил в БН-исчислении название покоординатного расчёта, который возможен исключительно благодаря использованию инвариантных свойств текущего параметра  $u$ .

Воспользовавшись методом подвижного симплекса [10], составим в общем виде геометрическую схему моделирования двухфакторного процесса в виде двухпараметрического линейчатого многообразия (рис. 1). Поскольку для определения модели

процесса используются линейные зависимости, образующая искомого геометрического объекта также как и направляющие будет линией, каждая из которых определяется 2-мя точками. Таким образом, двухфакторный процесс в общем случае определяется 4-мя точками, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации, и порождает

линейчатую поверхность. Если направляющие прямые  $A_1A_2$  и  $B_1B_2$  скрещиваются, то геометрической моделью искомого процесса будет гиперболический параболоид. А в случае, когда направляющие прямые принадлежат одной плоскости, получим линейчатую поверхность нулевой кривизны.

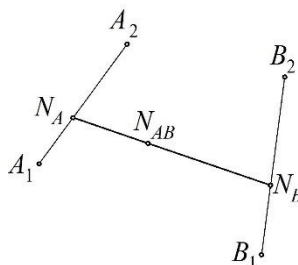


Рис. 1. Геометрическая схема моделирования двухпараметрического линейчатого многообразия

Fig. 1. The geometric scheme to modeling a two-parameter linear variety

Аналитическое описание такого линейчатого многообразия (рис. 1) в точечной форме имеет следующий вид:

$$\begin{cases} N_A = A_1\bar{u} + A_2u \\ N_B = B_1\bar{u} + B_2u \Rightarrow N_{AB} = A_1\bar{u}\bar{v} + A_2u\bar{v} + B_1\bar{u}v + B_2uv, \\ N_{AB} = N_A\bar{v} + N_Bv \end{cases} \quad (2)$$

где  $N_{AB}$  – текущая точка двухпараметрического линейчатого многообразия, которая своим движением заполняет пространство, формируя тем самым геометрический объект, соответствующий искомой модели процесса;

$A_i$  и  $B_i$  – исходные точки, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации;

$0 \leq u \leq 1$  и  $0 \leq v \leq 1$  – текущие параметры двухпараметрического линейчатого многообразия;  $\bar{v} = 1 - v$  – дополнение текущего параметра  $v$  до 1.

Выполнив покоординатный расчёт, для трёхмерного пространства получим следующую систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x_{N_{AB}} = x_{A_1}\bar{u}\bar{v} + x_{A_2}u\bar{v} + x_{B_1}\bar{u}v + x_{B_2}uv; \\ y_{N_{AB}} = y_{A_1}\bar{u}\bar{v} + y_{A_2}u\bar{v} + y_{B_1}\bar{u}v + y_{B_2}uv; \\ z_{N_{AB}} = z_{A_1}\bar{u}\bar{v} + z_{A_2}u\bar{v} + z_{B_1}\bar{u}v + z_{B_2}uv. \end{cases} \quad (3)$$

В общем случае все проекции на координатные оси являются равноправными, но для аналитического описания модели процесса необходимо получить зависимость функции отклика от влияющих на неё факторов (другими словами, зависимость одной проекции от других). Пусть требуется определить зависимость функции отклика  $z_{N_{AB}}$  от двух факторов  $x_{N_{AB}}$  и  $y_{N_{AB}}$ . Тогда

параметры  $u$  и  $v$  необходимо определить из первых двух уравнений системы (3), соответствующие положению горизонтальной проекции искомой геометрической модели процесса. При этом стоит учитывать, что исходные данные для моделирования практически всегда располагаются на прямоугольном или квадратном плане, например, как показано на рис. 2.

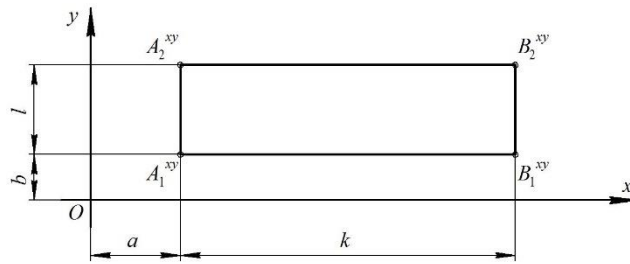


Рис. 2. Билинейная интерполяция на прямоугольном плане

Fig. 2. Bilinear interpolation on a rectangular plan

Здесь  $A_1^{xy}$ ,  $A_2^{xy}$ ,  $B_1^{xy}$  и  $B_2^{xy}$  – соответственно проекции точек  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$  на горизонтальную плоскость проекций  $xOy$ . При таком условии система параметрических уравнений (3) примет следующий вид:

$$\begin{cases} x_{N_{AB}} = kv + a; \\ y_{N_{AB}} = lu + b; \\ z_{N_{AB}} = z_{A_1} \bar{u}\bar{v} + z_{A_2} u\bar{v} + z_{B_1} \bar{u}v + z_{B_2} uv. \end{cases} \quad (4)$$

После преобразований из системы уравнений (4) получим зависимость функции отклика  $z_{N_{AB}}$  от двух факторов  $x_{N_{AB}}$  и  $y_{N_{AB}}$ :

$$z_{N_{AB}}(x_{N_{AB}}, y_{N_{AB}}) = a_0 x_{N_{AB}} y_{N_{AB}} + a_1 x_{N_{AB}} + a_2 y_{N_{AB}} + a_3, \quad (5)$$

где  $a_i$  – коэффициенты билинейного интерполянта, которые определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{z_{B_2} + z_{A_1} - z_{A_2} - z_{B_1}}{kl}; \\ a_1 &= \frac{b(z_{A_2} + z_{B_1} - z_{B_2} - z_{A_1}) - l(z_{A_1} - z_{B_1})}{kl}; \\ a_2 &= \frac{a(z_{A_2} + z_{B_1} - z_{B_2} - z_{A_1}) - k(z_{A_1} - z_{B_1})}{kl}; \\ a_3 &= \frac{b(z_{B_2} + z_{A_1} - z_{A_2} - z_{B_1}) + l(z_{A_1} - z_{B_1}) + k((z_{A_1} - z_{A_2})b + lz_{A_1})}{kl}. \end{aligned}$$

Таким образом, билинейная интерполяция (5), которая получила широкое распространение в инженерной и научной практике, является частным случаем, который можно выделить из двухпараметрического линейчатого многообразия (2).

Аналогичным образом, получим точечное уравнение трёхпараметрического линейчатого многообразия в общем виде, геометрическая схема которого представлена на рис. 3:

$$M = A_1 \bar{u}\bar{v}\bar{w} + A_2 u\bar{v}\bar{w} + B_1 \bar{u}v\bar{w} + B_2 uv\bar{w} + C_1 \bar{u}\bar{v}w + C_2 u\bar{v}w + D_1 \bar{u}vw + D_2 uvw, \quad (6)$$

где  $\bar{w} = 1 - w$  – дополнение текущего параметра  $w$  до 1.

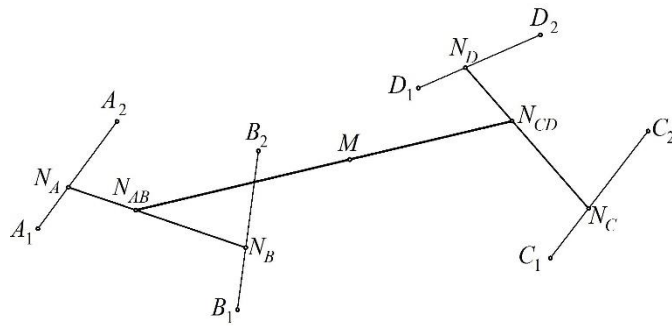


Рис. 3. Геометрическая схема моделирования трёхпараметрического линейчатого многообразия

Fig. 3. The geometric scheme to modeling a three-parameter linear variety

В общем случае геометрические объекты, выделенные из трёхпараметрического линейчатого многообразия, могут представлять собой как разнообразные трёхпараметрические линейчатые гиперповерхности отклика, так и гиперплоскость, принадлежащую 4-мерному пространству. Всё зависит от взаимного положения точек, определяемых исходными данными для моделирования. Также можно из полученного

множества выделить геометрический объект, аналитическое описание которого будет соответствовать трилинейному интерполянту. Для этого достаточно представить трёхмерный план регулярной сети точек в форме параллелепипеда (по аналогии с рис. 2) и установить линейную зависимость между проекциями текущей точки на координатные оси и текущими параметрами, по аналогии с (4).

$$\begin{cases} x_M = kv + a; \\ y_M = lu + b; \\ z_M = mw + c; \\ t_M = t_{A_1} \bar{u}v\bar{w} + t_{A_2} u\bar{v}\bar{w} + t_{B_1} \bar{u}v\bar{w} + t_{B_2} uv\bar{w} + t_{C_1} \bar{u}\bar{v}w + t_{C_2} u\bar{v}w + t_{D_1} \bar{u}vw + t_{D_2} uvw, \end{cases}$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – нулевые значения соответствующих координат, которые определяют расстояние от параллелепипеда, до начала декартовой системы координат;

$k$ ,  $l$  и  $m$  – размеры трёхмерного плана регулярной сети точек в форме параллелепипеда.

Аналогичным образом можно получить аналитическое описание линейчатых многообразий любой размерности, для которых полилинейная интерполяция будет частным случаем.

### ПРИНЦИПЫ АППРОКСИМАЦИИ ДИСКРЕТНОГО МНОЖЕСТВА ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙЧАТЫХ МНОГООБРАЗИЙ

В отличие от многомерной интерполяции, процесс аппроксимации подразумевает моделирование геометрического объекта, наиболее приближенного к исходному множеству точек, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации. При этом можно использовать готовые модели геометрических объектов, полученные с помощью многомерной интерполяции, в качестве аппроксимирующих. Тогда многомерную сеть

точек для аппроксимации следует формировать в пространстве на единицу меньше, чем требуется для описания всего геометрического объекта в целом. Использование линейчатых многообразий не является исключением. Таким образом, необходимо, исходя из количества факторов, влияющих на функцию отклика, выбрать нужное линейчатое многообразие и выделить из него геометрический объект, наиболее приближенный к исходным данным. Тогда в общем случае задачу аппроксимации можно представить как минимизацию суммы квадратов длин отрезков между заданными точками и узловыми точками многомерной интерполяции

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (M_i - K_j)^2 \rightarrow \min.$$

где  $M_i$  – массив точек, принадлежащих аппроксимирующему геометрическому объекту многомерного пространства;

$K_j$  – массив заданных точек, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации;

$p$  – размерность пространства, которому принадлежит геометрический объект;

$q$  – соответствует числу экспериментально-статистических данных.

Однако с использованием регулярной многомерной сети точек, по аналогии с многомерной интерполяцией, задачу

аппроксимации можно значительно упростить и минимизировать только сумму квадратов разности по одной из координат, соответствующей функции отклика. Тогда получим частный случай многомерной аппроксимации – метод наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^q (y_{M_i} - y_{K_i})^2 \rightarrow \min.$$

Точность аппроксимации, по аналогии с регрессионным анализом, будем оценивать с помощью коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^q (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^q (\bar{y} - y_i)^2},$$

где  $\sum_{i=1}^q (\hat{y}_i - y_i)^2$  – сумма квадратов регрессионных остатков, которая включает фактические  $y_i$  и расчётные  $\hat{y}_i$  значения функции отклика.

$$\sum_{i=1}^q (\bar{y} - y_i)^2 \text{ – общая дисперсия;}$$

$\bar{y}$  – выборочное среднее.

Исходя из этого, получим следующий принципиальный вычислительный алгоритм аппроксимации дискретного множества точек с помощью линейчатых многообразий, соответствующий полилинейной аппроксимации:

1. Исходя из количества факторов, влияющих на функцию отклика, выбираем нужное количество параметров, определяющих размерность пространства, которому будет принадлежать искомое линейчатое многообразие.

2. Формируем многомерный план регулярной сети точек в форме многомерного параллелепипеда для построения аппроксимирующего геометрического объекта. При этом размерность пространства для построения сети точек аппроксимирующего объекта будет на единицу меньше, чем размерность пространства, в котором будет находиться моделируемый геометрический объект.

3. В соответствии с принятой аппроксимирующей сетью точек устанавливаем линейную зависимость между параметрами и факторами геометрической модели, которые соответствуют осям глобальной декартовой системы координат.

4. Составляем целевую функцию, представляющую собой сумму квадратов длин отрезков между исходными точками и их аналогами, принадлежащими аппроксимирующему геометрическому объекту.

5. Минимизируем целевую функцию. Для этого составляем и решаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, количество которых

соответствует количеству узловых точек сети аппроксимирующего геометрического объекта.

6. Проверяем результат моделирования путём определения коэффициента детерминации  $R^2$ . В случае неудовлетворительного результата повторяем алгоритм с самого начала, выбирая при этом для формирования аппроксимирующего геометрического объекта вместо линейчатых многообразий криволинейные [1-3], полученные аналогичным способом с помощью кривых, проходящих через наперёд заданные точки [6].

### ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАКТОРНОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ТРИЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Рассмотрим в качестве примера возможности предложенного подхода к моделированию трёхфакторного процесса. В работе [11] получены экспериментальные данные зависимости функции отклика (температура внутренней поверхности наружного ограждения  $\tau_{BH}$ ) от трёх факторов: углового коэффициента  $\varphi$ , температуры поверхности излучателя  $t_{II}$  и температуры наружного воздуха  $t_H$ . Необходимо аппроксимировать полученные экспериментальные данные с помощью линейчатых многообразий, рассмотренных выше.

Каждый отдельный опыт проводился 30 раз. Для проведения вычислительного эксперимента полученные экспериментальные данные

предлагается усреднить в пределах каждого опыта.  
Результаты усреднения представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Усреднённые данные зависимости температура внутренней поверхности наружного ограждения  $\tau_{BH}$  от трёх факторов

**Table 1.** Averaged data the dependence temperature from the inner surface of the outer fence  $\tau_{BH}$  on three factors

Факторы		Температура наружного воздуха $t_H$ , °C							
$\varphi$	$t_{II}$ , °C	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
0,07	40	-21,17	-16,37	-11,67	-6,91	-2,14	2,7	7,49	10,53
0,07	60	-19,3	-14,47	-9,7	-4,92	-0,13	4,66	9,43	12,37
0,07	80	-17,1	-12,31	-7,6	-2,77	1,84	6,67	11,45	14,51
0,235	40	-13,63	-9,4	-5,07	-0,83	3,28	7,42	11,7	14,15
0,235	60	-8,06	-3,82	0,55	4,56	8,74	12,92	17,25	19,66
0,235	80	-2,52	1,73	5,84	10,07	14,38	18,52	22,61	25,01
0,4	40	-5,81	-2,23	1,42	4,93	8,62	12,22	15,96	17,88
0,4	60	3,22	6,75	10,32	13,97	17,52	21,03	24,75	27,11
0,4	80	12,38	15,92	19,44	23,12	26,81	30,2	33,6	35,59

Следует отметить, что интервал изменения для каждого из трёх факторов, представленных в таблице 1, является одинаковым, кроме последнего столбца, соответствующего температуре наружного воздуха 8°C. Использование равномерных интервалов в значительной степени упрощает процесс организации циклов при проведении вычислительного эксперимента. Исходя из этого, исключим из исходных данных последний столбец и используем его в качестве дополнительной проверки результатов аппроксимации.

Рассмотрим моделируемый процесс в четырёхмерном пространстве. Тогда одна из осей

координат будет соответствовать функции отклика, а три других – влияющим на неё факторам. Соответственно выбираем для аппроксимации трехпараметрическое линейчатое многообразие, которое описывается точечным уравнением (6).

Установим линейную зависимость между проекциями текущей точки на координатные оси  $\varphi$ ,  $t_{II}$ ,  $t_H$  и текущими параметрами  $u$ ,  $v$ ,  $w$ . Для этого сформируем регулярную сеть точек в форме параллелепипеда, вершины которого определяются нижним и верхним уровнями варьирования факторов [11].

$$\begin{aligned} \varphi &= 0,07(1-u) + 0,33u; \\ t_{II} &= 40(1-v) + 80v; \\ t_H &= -25(1-w) + 5w. \end{aligned} \tag{7}$$

В соответствии с выражением (6) функция отклика будет определяться следующим параметрическим уравнением:

$$\tau_{BH} = a_1\bar{u}\bar{v}\bar{w} + a_2u\bar{v}\bar{w} + b_1\bar{u}v\bar{w} + b_2u\bar{v}w + c_1\bar{u}\bar{v}w + c_2u\bar{v}w + d_1\bar{u}vw + d_2uvw. \tag{8}$$

Выразив из (7) параметры  $u$ ,  $v$ ,  $w$  и подставив в (8), получим уравнение целевой функции в явном виде:

$$\begin{aligned} \tau_{BH} = & (((0,013 - 0,0025t_H)t_{II} + 0,2t_H - 1,01)\varphi + (0,001t_H - 0,005)t_{II} - 0,081t_H + 0,4)a_1 + \\ & + (((0,0025t_H - 0,013)t_{II} - 0,2t_H + 1,01)\varphi + (-0,0002t_H + 0,0009)t_{II} + 0,014t_H - 0,071)a_2 + \\ & + (((0,0025t_H - 0,013)t_{II} - 0,1t_H + 0,51)\varphi + (-0,001t_H + 0,005)t_{II} + 0,04t_H - 0,2)b_1 + \\ & + (((0,013 - 0,003t_H)t_{II} + 0,1t_H - 0,51)\varphi + (0,0002t_H - 0,0009)t_{II} - 0,007t_H + 0,035)b_2 + \\ & + (((0,003t_H + 0,063)t_{II} - 0,2t_H - 5,051)\varphi - (0,001t_H + 0,025)t_{II} + 0,081t_H + 2,02)c_1 - \\ & - (((0,003t_H + 0,063)t_{II} + 0,2t_H + 5,051)\varphi + (0,0002t_H + 0,0044)t_{II} - 0,014t_H - 0,354)c_2 - \\ & - (((0,003t_H + 0,063)t_{II} + 0,1t_H + 2,525)\varphi + (0,001t_H + 0,025)t_{II} - 0,04t_H - 1,01)d_1 + \\ & + (((0,003t_H + 0,063)t_{II} - 0,1t_H - 2,525)\varphi - (0,0002t_H + 0,0044)t_{II} + 0,007t_H + 0,177)d_2. \end{aligned}$$

Минимизируем невязку между значениями полученного целевого уравнения и исходными экспериментальными данными из табл. 1. Для этого составляем и решаем систему из 8 линейных дифференциальных уравнений первого порядка,

дифференцируя целевую функцию поочередно по параметрам  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ .

В результате получим искомое уравнение трёхпараметрической гиперповерхности, аналитическое описание которого соответствует зависимости функции отклика от трёх факторов:

$$\begin{aligned} \tau_{BH} = & -0,0006\varphi t_{II} t_H + 1,0555\varphi t_{II} - 0,6779\varphi t_H - 13,288\varphi - \\ & - 0,00002t_{II} t_H + 0,0262t_{II} + 1,0071t_H - 0,3835. \end{aligned}$$

Для проверки точности аппроксимации был рассчитан коэффициент детерминации, который в данном случае достиг значения практически равного единице:  $R^2 = 0,99997$ . Однако такой высокий коэффициент детерминации является следствием большого значения дисперсии. Поскольку исходные данные имели значительный разброс значений, как

отрицательных, так и положительных, что сказывается на значении выборочного среднего.

Исходя из этого, дополнительно для оценки точности аппроксимации проанализированы квадратичные отклонения расчётных значений от экспериментальных данных, в том числе и за пределами аппроксимируемой области экспериментальных значений. Фрагмент этого анализа представлен в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение точности результатов аппроксимации

Table 2. The comparison to the accuracy of approximation

Факторы		Температура наружного воздуха $t_H, ^\circ\text{C}$								
$\varphi$	$t_{II}, ^\circ\text{C}$	-25			-5			8		
		Исх. знач.	Расч. знач.	Квад. откл.	Исх. знач.	Расч. знач.	Квад. откл.	Исх. знач.	Расч. знач.	Квад. откл.
0,07	40	-21,17	-21,24	0,0043	-2,14	-2,1	0,0019	10,53	10,34	0,0358
0,07	60	-19,3	-19,2	0,0098	-0,13	-0,09	0,0017	12,37	12,33	0,001
0,07	80	-17,1	-17,17	0,0049	1,84	1,92	0,0068	14,51	14,36	0,0355
0,235	40	-13,63	-13,56	0,0046	3,28	3,26	0,0005	14,15	14,19	0,0013
0,235	60	-8,06	-7,99	0,0047	8,74	8,76	0,0005	19,66	19,65	0,0003
0,235	80	-2,52	-2,42	0,0113	14,38	14,26	0,0152	25,01	25,1	0,0091
0,4	40	-5,81	-5,88	0,0051	8,62	8,61	0,00002	17,88	18,03	0,025
0,4	60	3,22	3,23	0,00001	17,52	17,61	0,0076	27,11	26,96	0,0235
0,4	80	12,38	12,33	0,0022	26,81	26,6	0,0426	35,59	35,88	0,0819

В результате сумма квадратичных отклонений в аппроксимируемой области значений составила

0,331, что является очень качественным результатом. С учётом значений для температуры

наружного воздуха  $t_H = 8\text{ }^\circ\text{C}$ , которые не сходили в аппроксимируемую область сумма квадратичных отклонений в аппроксимируемой области значений составила всего 0,545 на 63 экспериментальных значений. При этом усреднённое значение квадратичного отклонения составила 0,0086, что подтверждает достоверность полученных результатов.

## ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены как общий подход к формированию линейчатых многообразий в БН-исчислении, так и его частные случаи. В частности те из них, которые сводятся к полилинейным интерполяции и аппроксимации. Их можно рассматривать как обобщение существующих способов полилинейной интерполяции и аппроксимации. Принципиальное отличие предложенного обобщения заключается в том, что получены в общем виде точечные уравнения линейчатых многообразия для любого наперёд заданного количества точек. При этом полученные точечные уравнения, являются инвариантными по отношению к любым преобразованиям и остаются полностью справедливыми даже при совпадении исходных точек, что соответствует совпадению их координат. Кроме того предложенные исследования и их результаты полностью укладываются в концепцию авторов о геометрическом моделировании многофакторных процессов и явлений на основе многомерных интерполяции и аппроксимации с помощью геометрических объектов, проходящих через наперёд заданные точки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конопацкий Е.В. Геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений методом многомерной интерполяции // Труды Международной научной конференции по физико-технической информатике СРТ2018 (28-31 мая 2018 г.). Москва-Протвино, 2018. С.299-306.
2. Конопацкий Е.В. Принципы построения компьютерных моделей многофакторных процессов и явлений методом многомерной интерполяции // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции: «Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2018)» (14-15 ноября 2018 г.). Донецк: ДонНТУ, 2018. С. 277-287.
3. Конопацкий Е.В. Подход к построению геометрических моделей многофакторных процессов и явлений многомерной интерполяции // Программная инженерия. М.: 2019. Т.10. № 2. С. 77-86.
4. Конопацкий, Е.В. Аппроксимация геометрических объектов с помощью дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки //

Информационные технологии. М.: 2019. № 1. Т. 25. С. 46-52. DOI: 10.17587/it.25.46-51.

5. Конопацкий Е.В. Моделирование аппроксимирующего 16-точечного отсека поверхности отклика, применительно к решению неоднородного уравнения теплопроводности // Геометрия и графика. М.: Инфра-М, 2019. Т.7. №2. С.38-45. DOI: 10.12737/article\_5d2c1a551a22c5.12136357.

6. Конопацкий Е.В. Моделирование дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки // Вестник компьютерных и информационных технологий. М.: 2019. № 2. С. 30-36. DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.030-036.

7. Балюба И.Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01. Макеевка, 1995. 227 с.

8. Балюба И.Г., Найдыш В.М. Точечное исчисление: учебное пособие. Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. 236 с.

9. Бумага А.И., Конопацкий Е.В., Крысько А.А., Чернышева О.А. Введение в математический аппарат БН-исчисления. Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом ВУЗе: традиции и инновации». Пермь: ПНИПУ, 2017. Вып. 4. С. 76-82.

10. Метод подвижного симплекса при конструировании 2-поверхностей многомерного пространства / Балюба И.Г., Полищук В.И., Горягин Б.Ф., Малютин Т.П., Давыденко И.П., Конопацкий Е.В., Кокарева Я.А. // Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць. К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України, 2010. Т.1. С.310-318.

11. Щацков А.О. Повышение эффективности работы систем низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03. Макеевка, 2018. 182 с.

## REFERENCES

1. Konopatskiy E.V. Geometric modeling and optimization of multifactor processes and phenomena by multidimensional interpolation // Proceedings of the International scientific conference on physical and technical Informatics СРТ2018 (28-31 may 2018). Moscow-Protvino, 2018. 299-306 pp. (In Russian)
2. Konopatskiy E.V. Principles of construction of computer models of multifactor processes and phenomena by the method of multidimensional interpolation // Proceedings of the II International scientific and practical conference: "Software engineering: methods and technologies of development of information and computing systems (PIIVS-2018)" (14-15 November 2018). Donetsk: DonNTU, 2018. 277-287 pp. (In Russian)
3. Konopatskiy E.V. Approach to the construction of geometric models of multifactor processes and phenomena of multidimensional interpolation //

Software engineering. Moscow: 2019. Vol. 10. No. 2. 77-86 pp. (In Russian)

4. Konopatskiy E.V. Approximation of geometric objects using arcs of curves passing through predetermined points // Information technology. Moscow: 2019. No. 1. Vol. 25. 46-52 pp. DOI: 10.17587/it.25.46-51. (In Russian)

5. Konopatskiy E.V. Modeling of the approximating 16-point compartment of the response surface, as applied to the solution of the inhomogeneous heat equation // Geometry and graphics. Moscow: Infra-M, 2019. Vol. 7. No. 2. 38-45 pp. DOI: 10.12737/article\_5d2c1a551a22c5.12136357. (In Russian)

6. Konopatskiy E.V. Modeling of arcs of curves passing through predetermined points // Bulletin of computer and information technologies. Moscow: 2019. No. 2. 30-36 pp. DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.030-036. (In Russian)

7. Baluba I.G. Constructive geometry of varieties in point calculus: dis. Dr. Techn. Sciences: 05.01.01. Makeyevka, 1995. 227 p. (In Russian)

8. Baluba I.G., Naidysh V.M. Point calculus: textbook. Melitopol: MSPU them B.Khmelniyskiy, 2015. 236 p. (In Russian)

9. Bumaga A.I., Konopatskiy E.V., Krysko A.A., Chernysheva O.A. Introduction to the mathematical apparatus of BN-calculation. Materials VII International scientific and practical Internet conference "Quality problems of graphic training of students in a technical University: traditions and innovations". Perm: PNRPU, 2017. Issue. 4. 76-82 pp. (In Russian)

10. Method of rolling of the simplex in the design of the 2-surfaces in the multidimensional space / Baluba I.G., Polishchuk V.I., Garyagin B.F., Malyutina T.P., Davidenko I.P., Konopatskiy E.V., Kokareva J.A. // modeling and information technologies: collection of scientific works. Kiev: Institute of modeling problems in power engineering. G.E. Pukhov NAS of Ukraine, 2010. Vol.1. P. 310-318. (In Russian)

11. Shatskov A.O. Increase of efficiency of systems with low temperature radiant heating of residential and public buildings: dis. ... kand. Techn. Sciences: 05.23.03. Makeyevka, 2018. 182 p. (In Russian)

## A GENERAL APPROACH TO MULTILINEAR INTERPOLATION AND APPROXIMATION BASED ON LINEAR MANIFOLDS

Konopatskiy E.V. , Rotkov S.I. , Krysko A.A.

**Summary.** In this paper we propose a General approach to the geometric modeling of multiparameter linear manifolds with their subsequent analytical description in BN-calculation. This approach is a special case of geometric modeling of multiparameter manifolds passing through pre-defined points. If the coordinates of the source points correspond to some experimental and statistical information, the resulting geometric object will be a reflection in model of the multivariate process obtained by multivariate interpolation. A distinctive feature of this approach is the fulfillment in condition of the passage by simulated geometric object through the predetermined points, which allows you to immediately obtain the desired result without the need to compile and solve complex systems of algebraic equations. In this case, the use of linear manifolds obtained on the basis of linear dependence parameters, which are an invariant of parallel projection, due to its simplicity and ease of calculation is in many cases more preferable to other possible models of the process or phenomenon under study. And the use of a regular multidimensional network plan with nodal points in the form of a dimensional generalization of a rectangle makes it easy to move from a system of parametric equations to the equation of the model explicitly. In addition, the obtained linear manifolds can be used for geometric modeling of multifactor processes and phenomena by multidimensional approximation of the initial set of points or, by analogy with multidimensional interpolation, some experimental and statistical data. Thus, the example of geometric modeling to dependence inner surface of the outer fence temperature on three factors and its results confirm the effectiveness of the application by proposed approach to the modeling of multifactor processes and phenomena using multidimensional interpolation and approximation based on linear manifolds.

**Key words:** linear manifolds, multilinear interpolation, multilinear approximation, geometric modeling, multifactorial process, BN-calculation.

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПРЕСНЕНИЮ МОРСКОЙ И ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ: СОКРАЩЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ И УТИЛИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАТОВ

А.Г. Первов<sup>1</sup>, А.П. Андрианов<sup>1</sup>, В.А. Головесов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кафедра Водоснабжения и водоотведения, Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет

129997, Москва, Ярославское шоссе, 26 (Кафедра ВиВ НИУ МГСУ) e-mail: PervovAG@mgsu.ru

**Аннотация.** Представлены результаты работ по изучению возможности снабжения Крыма опресненной водой, проводившиеся с начала 70-х годов прошлого века. Описан подход, основанный на применении систем опреснения морской и подземной воды, используемых для водоснабжения небольших объектов (поселков, предприятий, баз отдыха и др.). Представлены результаты проведенных за последние 30 лет исследований, направленных на совершенствование технологий опреснения, снижение эксплуатационных затрат, сокращение сброса концентратов.

**Предмет исследования:** подземные воды различного химического состава, вода Черного моря, возможность снижения величины общего соледержания, жесткости, бора; определение затрат на электроэнергию и исследование возможности их сокращения; определение расходов и составов концентратов и изучение возможностей сокращения их сбросов.

**Материалы и методы:** экспериментально определены зависимости скоростей образования на мембранах осадков малорастворимых солей, влияющие на потерю производительности и селективности мембран и определяющие затраты на реагенты для предотвращения образования этих осадков и их растворение. На основании полученных данных сделаны расчеты по определению затрат на сервисные реагенты и электроэнергию. Работы проводились с использованием промышленно выпускаемых мембран для опреснения воды с различными характеристиками (производства компании "CSM" – Корея). Представлены полученные экспериментально зависимости, демонстрирующие изменение производительности и селективности мембран при обработке вод с различными величинами жесткости и соледержания, а также изменение скоростей образования отложений карбоната кальция в различных мембранных аппаратах.

**Выводы:** полученные результаты определения эксплуатационных затрат опреснительных установок и влияния на них величин соледержания, концентраций жесткости и бора, а также типов применяемых реагентов и мембран, позволяет выбрать оптимальные значения параметров проведения процесса опреснения (величин рабочего давления и выхода фильтрата) на стадии проектирования.

**Ключевые слова:** обратный осмос; опреснение подземных вод; опреснение морской воды; осадки малорастворимых в воде солей; ингибиторы осадкообразования; снижение бора при опреснении; утилизация концентратов опреснительных установок.

### ВВЕДЕНИЕ

С начала 70-х до конца 80-х годов прошлого века в СССР проводились разработки и создание систем хозяйственно-питьевого водоснабжения южных районов России, в т.ч. Крыма, испытывающих острый недостаток в пресной воде. Была также утверждена Государственная программа по опреснению воды и снабжению ряда районов Казахстана и Узбекистана питьевой водой. Такая программа рассматривалась, как альтернатива проекту переброски воды северных рек для восполнения дефицита водных ресурсов Казахстана и Узбекистана. Однако, начало работ по осуществлению этого проекта встретило серьезный общественный отпор, а проект был признан "экологически несостоятельным". Институты ВНИИ ВОДГЕО и Союзгипроводхоз предложили

организовать питьевое водоснабжение за счет опреснения воды из подземных водоисточников. Решение такой проблемы предполагало создание водозаборов, систем сбора и утилизации концентратов установок, очистки и утилизации бытовых сточных вод, орошения, сбора и повторного использования коллекторно-дренажных вод, что требовало привлечения специалистов самых разных направлений. К сожалению, в то время эта программа не была осуществлена, поскольку уровень разработок в области опреснительных и мембранных технологий считался недостаточным для широкого промышленного внедрения.

В основе решения проблемы снабжения населения Крыма опресненной водой лежало применение небольших (от 25 до 500 куб.м в сутки) систем опреснения морской и подземной воды, позволяющих производить воду питьевого качества

для жителей небольших поселков, хозяйств и предприятий. Разработки, изготовление, строительство и эксплуатация опреснительных установок велись такими известными организациями, как НПО "Полимерсинтез", НПО "Химволокно" (производство мембран), ПКБ "Пластмаш", "Союзгипроводхоз" (проектирование и изготовление установок), ВНИИ ВОДГЕО (разработка технологий опреснения). Первый опыт применения опреснительных установок на территории Крыма показал, что их эффективному практическому применению препятствовал ряд нерешенных научных и технических проблем: наличие потоков концентратов (высокоминерализованных растворов), требующих утилизации; высокий расход электроэнергии; использование дорогостоящих реагентов и промывочных растворов; низкая надежность систем, связанная с необходимостью проведения частых химических промывок и замены мембран [1-5].

В настоящее время накопленный за последние 20 лет, как за рубежом, так и у нас в стране, опыт производства мембран и разработки технологий опреснения вод разной минерализации свидетельствует о том, что диапазон применения этих установок может быть значительно расширен, а технико-экономические показатели значительно улучшены.

Наблюдающийся в последние годы прогресс в области совершенствования обратноосмотических мембран позволяет сделать вывод, что по показателям капитальных и эксплуатационных затрат мембранные технологии становятся все более конкурентоспособными в коммунальном водоснабжении. Это происходит благодаря тому, что растут удельные производительности мембран при одновременном снижении величин рабочего давления, что влечет за собой снижение стоимости расходуемой электроэнергии и реагентов, используемых в технологии предочистки.

В работе представлены результаты последних разработок, проведенных специалистами кафедры ВиВ НИУ МГСУ для совершенствования систем опреснения подземных и морских вод, рассмотрены:

- принципы снижения величины удельного расхода электроэнергии для опреснения до величины 1,5 кВт х час/куб. м для минерализованных подземных вод и до 2,2 кВт х час/ куб. м для воды Черного моря;

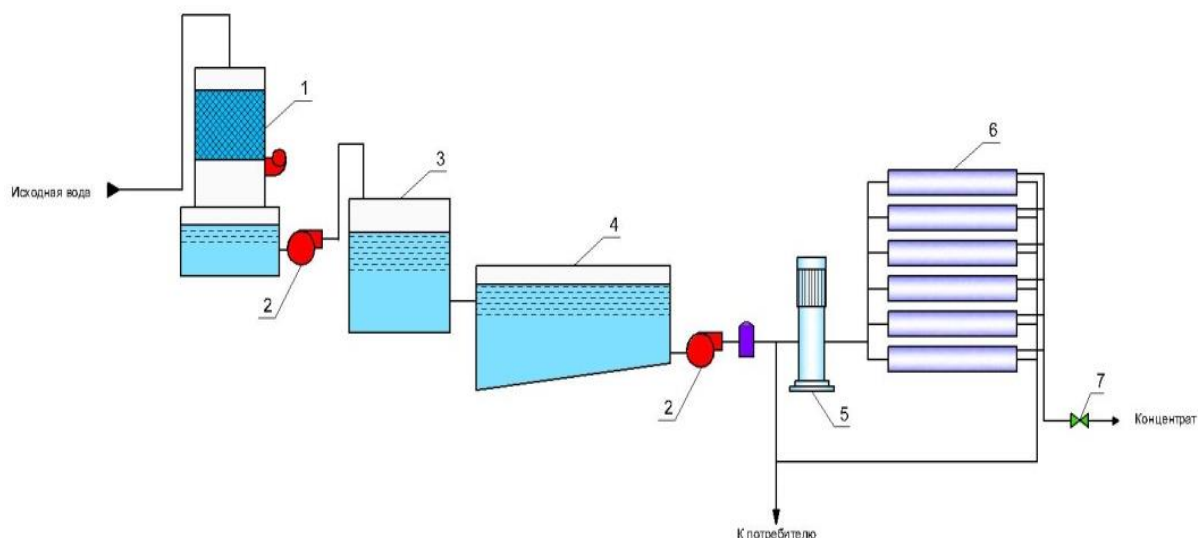
- принципы подбора характеристик мембран, обеспечивающих высокое качество опресненной воды при минимальных значениях эксплуатационных расходов опреснительных установок;

- принципы подбора эффективных реагентов и их расходов, обеспечивающих минимальные значения эксплуатационных затрат;

- принципы сокращения расходов концентратов опреснительных установок и их утилизации.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Создание систем опреснения подземных и морских вод требует решения целого ряда проблем, таких как: строительство водозаборного сооружения, строительство здания станции, обеспечение объекта электроэнергией, размещение оборудования, эксплуатация (проведение сервисных мероприятий), покупка и хранение реагентов и расходных материалов, подача очищенной воды потребителю, организация сброса и утилизации концентратов установок. Решение перечисленных вопросов требует высоких затрат, что и является причиной ограниченного применения опреснительных установок малой и средней производительности [1-5]. Настоящая работа представляет результаты новых исследований, которые легли в основу новых технологических разработок, позволяющих существенно сократить величины эксплуатационных затрат опреснительных установок и решить проблемы утилизации концентратов. Современные мембранные системы для очистки и опреснения подземных вод содержат: системы предочистки (для удаления из воды железа и предотвращения образования на мембранах осадков малорастворимых в воде солей); рабочие насосы высокого давления; мембранные аппараты (рис.1).



**Рис.1.** "Классическая" технология подготовки питьевой воды из подземной с использованием установок обратного осмоса: 1 - аэрация; 2 - насос; 3 - механический фильтр; 4 - резервуар очищенной воды; 5 - насос высокого давления; 6 - установка обратного осмоса; 7 - регулирующий давление вентиль.

**Fig. 1.** Conventional flow diagram of well water treatment using reverse osmosis techniques: 1 - aeration; 2 - pump; 3 - filter; 4 - purified water tank; 5 - high pressure pump; 6 - reverse osmosis unit; 7 - pressure regulation valve.

Выбор характеристик мембран оказывает существенное значение на величину эксплуатационных затрат [2-4]. Как показывает опыт эксплуатации мембранных установок при очистке подземных вод, селективность мембран оказывает существенное влияние не только на состав очищенной воды и эффективность очистки, но и на стоимость сервисных мероприятий [5]. Чем ниже селективность мембран, тем меньше оказывается интенсивность образования осадков малорастворимых солей на мембранах [6-8].

Настоящая работа предлагает научно обоснованный подход к выбору технологических схем, типов мембран и сервисных реагентов для мембранных станций очистки воды с целью снижения эксплуатационных затрат. Применение реагентов при опреснении воды связано с дозированием в исходную воду ингибиторов для предотвращения образования осадков малорастворимых в воде солей (карбоната и сульфата кальция) и с применением моющих химикатов для растворения накопленных на мембранах осадков [9-19]. Как было показано ранее [20], сравнительные испытания по определению скоростей образования осадков малорастворимых солей должны проводиться на одном элементе, поскольку у разных мембранных аппаратов на поверхности мембран может быть разное количество «застойных зон» и, соответственно, скорости осадкообразования в разных аппаратах

будут отличаться, несмотря на одинаковые условия их эксплуатации.

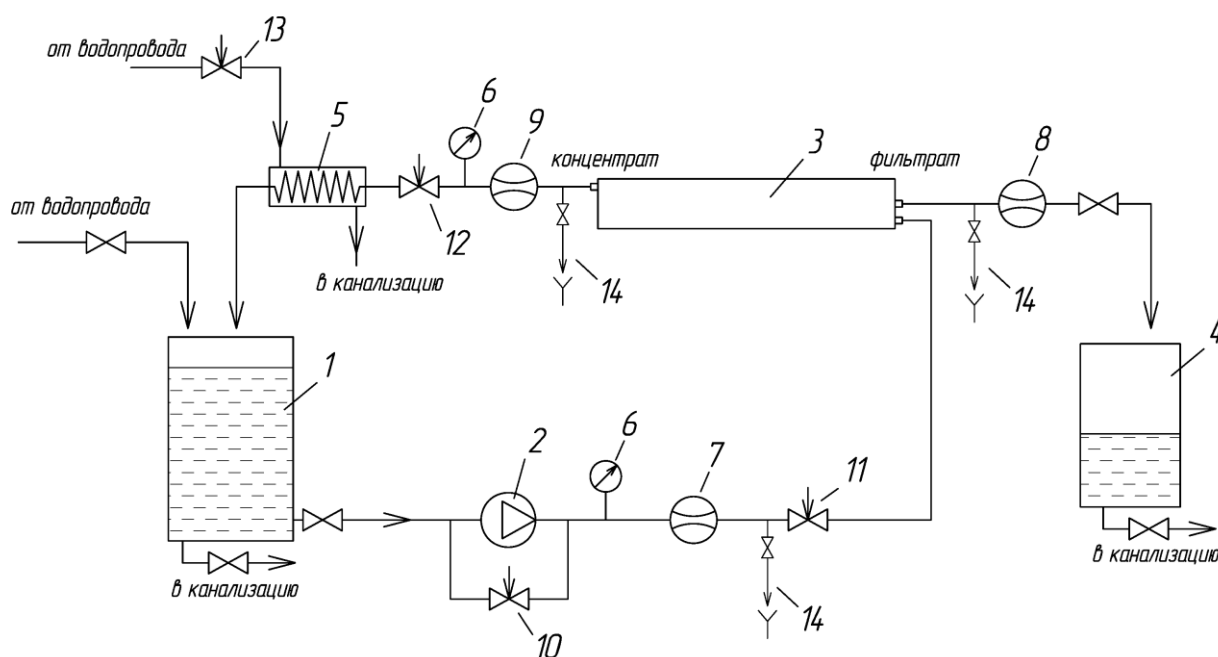
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис.2. Работа лабораторного стенда проводилась в режиме циркуляции. Исходная вода помещалась в бак исходной воды 1 емкостью 50 л. Из бака исходной воды вода насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3. Использовались рулонные мембранные элементы стандарта 4040 с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами производства компании CSM (Корея): модели 4040BE (обратноосмотические мембраны среднего давления), BLN 4040 (обратноосмотические мембраны низкого давления), 4040 90NE и 4040 70 NE (нанофильтрационные мембраны). Для предотвращения образования осадка карбоната кальция в исходную воду дозировались ингибиторы: "Аминат-К" (смесь натриевых солей фосфоновых кислот) и ПАСП (полиаспаргиновая кислота) производства Компании "Малотоннажная химия" (г. Москва). Химический состав растворов (имитаторов природных вод) представлены в Таблице 1.

**Таблица 1.** Состав имитатов природных вод, использовавшихся в экспериментах

**Table 1.** Composition of imitations of natural waters used in experiments

Тип исходной воды	Ca <sup>2+</sup> , мг-экв/л	Mg <sup>2+</sup> , мг-экв/л	Na, мг-экв/л	HCO <sub>3</sub> , мг-экв/л	SO <sub>4</sub> , мг-экв/л	Cl, мг-экв/л	Солесодержание, мг/л
Московская водопроводная вода	2,5	1,0	0,2	3,0	0,25	0,25	245-250
Имитат воды 1 (Евпатория)	7,6	2,3	6,2	4,1	5,9	6,1	986-1100
Имитат воды 2	16	8	10	6	10	28	3000
Имитат воды 3 (Черного моря)	10	50	261	1,0	20	300	17500
Фильтрат 1-ой ступени, НФ мембрана	1,0	4,0	56,2	0,2	1,0	60	3600
Фильтрат 1-ой ступени, ОО мембрана	0,2	0,5	40,8	0,5	1,0	4,0	2400



**Рис.2.** Схема экспериментального стенда.

1 - бак исходной воды; 2 - рабочий насос высокого давления; 3 - рулонный мембранный элемент в корпусе; 4 - бак сбора фильтрата; 5 - теплообменник; 6 - манометр; 7 - расходомер исходной воды; 8 - расходомер фильтрата; 9 - расходомер концентрата; 10 - кран байпаса; 11 - шаровый кран; 12 - регулирующий вентиль; 13,14 - пробоотборники

**Fig. 2.** Test unit flow diagram.

1- feed water tank; 2 - high pressure pump; 3 - spiral wound membrane element in pressure vessel; 4 - product water tank; 5 - heat exchanger; 6 - pressure gauge; 7 - feed water flow meter; 8 - product water flow meter; 9 - concentrate flow meter; 10 - bypass valve; 11 - ball-valve; 12 - regulation valve; 13,14 - samplers.

В процессе работы экспериментального стенда концентрат после мембранного аппарата возвращался в бак 1, а фильтрат сбрасывался в канализацию. Рабочее давление и расход

концентрата регулировались с помощью регулировочного вентиля 12, установленного на линии концентрата. Величина рабочего давления

составляла 9 - 12 бар. Отбор проб циркулирующего раствора осуществлялся из бака 1.

На рис.3 представлены результаты определения величины общего содержания фильтрата в зависимости от величины  $K$  - отношения объема исходной воды в баке 1 (рис. 2) в начале эксперимента к количеству воды в баке 1 в заданный момент эксперимента. Величина  $K$  (кратность снижения объема исходной воды в процессе эксперимента) связана с величиной выхода фильтрата  $V$  (отношения расхода фильтрату

к расходу исходной воды) соотношением:  $K = 1 / 1 - V$ . Как видно из рис.3, при опреснении имитата 1 (табл.1) могут быть использованы как обратноосмотические, так и нанофильтрационные мембраны. Максимально возможное значение  $K$  при опреснении воды соответствует точке пересечения кривой графика зависимости величины общего содержания от  $K$  с прямой, параллельной оси абсцисс, соответствующей значению величины общего содержания 1000 мг/л (что соответствует требованиям ВОЗ к питьевой воде).

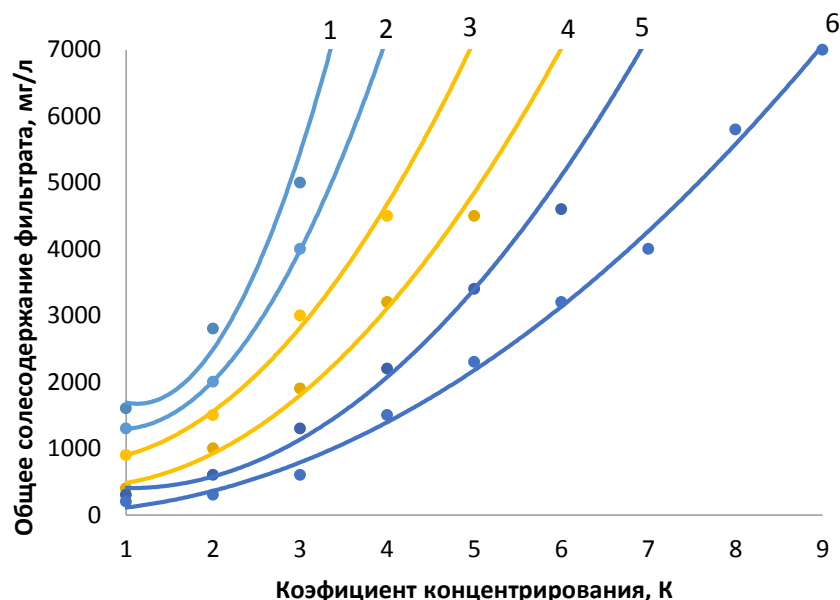


Рис.3. Влияние выбранного типа мембран на качество опресненной воды.

1 - имитат 2 ( Таблица 1), мембраны 70 NE; 2 - имитат 1 ( Таблица 1), мембраны 70 NE; 3 - имитат 2, мембраны 90NE; 4 - имитат 1, мембраны 90NE; 5 - имитат 2, мембраны BLN; 6 - имитат 1, мембраны BLN.

Fig. 3. Influence of membrane type on product water quality.

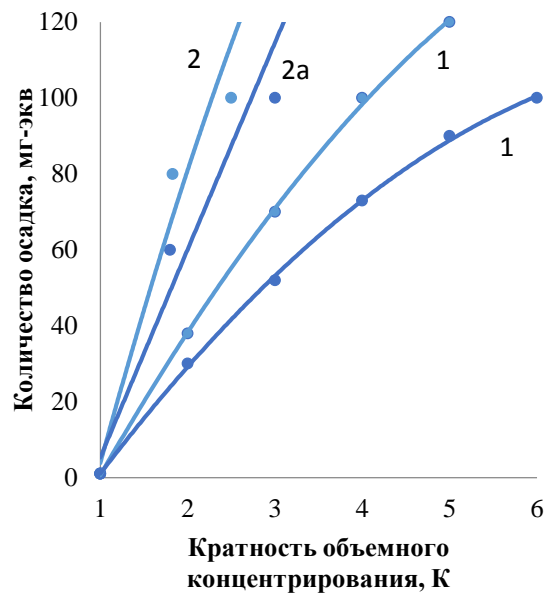
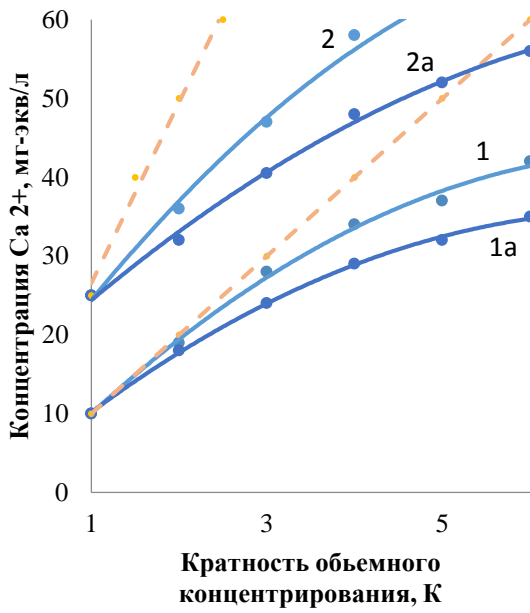
1 - the artificial water 1 ( Table1), 70 NE membranes; 2 - the artificial water 2, 70 NE membranes; 3 - the artificial 2, 90 NE membranes; 4 - the artificial 1, 90 NE membranes; 5 - the artificial 2, BLN membranes; 6 - the artificial 1, BLN membranes.

Определение скорости образования осадка карбоната кальция в мембранных аппаратах производилось в соответствии с методикой, разработанной авторами ранее [20,21]. Количество образовавшегося осадка в процессе эксперимента рассчитывалось как разница между количеством кальция в баке 1 в начале эксперимента и количеством кальция в концентрате в баке 1 в заданный момент времени [20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

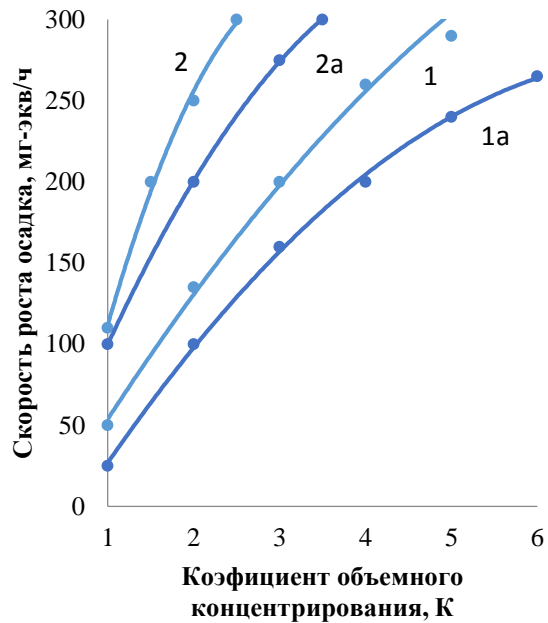
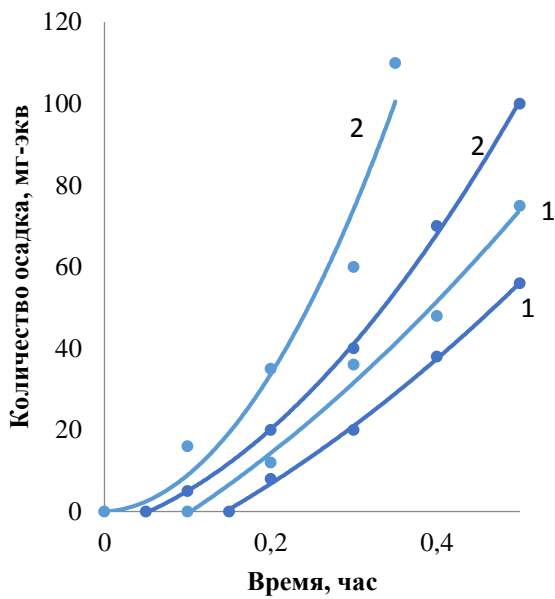
На рис.4 представлены результаты определения скоростей образования осадка карбоната кальция в мембранном аппарате рулонного типа с мембранами типа BLN. Определения производились на имитатах подземных вод Крыма (имитаты 1 и 2, Таблица 1). Определение скоростей образования карбоната кальция в мембранном аппарате производилось

для случаев опреснения имитатов 1 и 2, а также при добавлении в имитаты ингибитора "Аминат-К" в количестве 10 мл/ 1000 литров. На рис.4 показаны зависимости значений концентраций иона кальция от значения коэффициента концентрирования  $K$  (рис. 4,а) и количества образовавшегося осадка карбоната кальция от  $K$  (рис.4,б), где  $K$  определяется как соотношение объема в баке 1 в начальный момент времени к объему воды в заданный момент времени. Значения скоростей образования карбоната кальция определялись, как значения тангенса угла наклона касательной к кривой графика зависимости количества образовавшегося осадка от времени эксперимента (рис.4,в). Результаты определения скоростей роста осадка карбоната кальция в зависимости от  $K$  для имитатов 1 и 2 и случаев дозирования в них ингибитора "Аминат - К" (кривые 1,а и 2,а) представлены на рис. 4,г.



а)

б)



в)

г)

**Рис.4.** Результаты определения скоростей образования осадка при опреснении воды (имитаты 1 и 2, Таблица 1) без добавления ингибитора и с применением ингибитора Аминат-К. 1 - имитат 1 без добавления ингибитора; 1,а - имитат 1 с добавлением ингибитора; 2 - имитат 2 без добавления ингибитора; 2,а - имитат 2 с добавлением ингибитора.

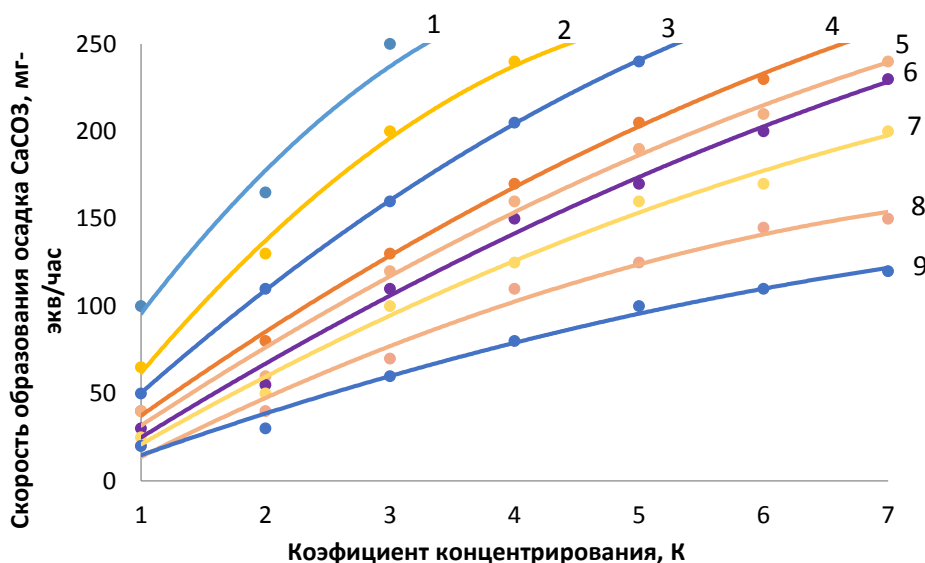
**Fig. 4.** Results of scaling rates determination during well water treatment ( the artificial 1 and 2, Table 1) without antiscalant addition and in the presence of "Aminat-K" antiscalant: 1 - the artificial 1 without antiscalant addition; 1,a - the artificial 1 with antiscalant addition; 2 - the artificial 2 without antiscalant addition; 2,a - the artificial 2 with antiscalant addition.

На интенсивность образования осадка карбоната кальция на мембранах большое влияние оказывает селективность мембран. При использовании

нанофильтрационных мембран с селективностью 70 и 90 процентов скорость образования осадка оказывается значительно ниже, чем в случае

использования обратноосмотических мембран [20]. На рис. 5 представлены результаты определения скоростей образования осадка в рулонных элементах типа 4040 BLN, 4040 90 NE и 4040 70 NE производства Корейской компании CSM соответственно с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами, с добавлением ингибитора Аминат-К в исходную воду и без. Как видно из рисунка, при обработке воды мембранами с низкой селективностью интенсивность образования осадка в мембранных аппаратах снижается, что повышает надежность работы мембранных установок и сокращает

эксплуатационные затраты на промывку мембран. Поэтому при обработке подземных вод с целью получения воды питьевого качества следует учитывать закономерности образования осадка карбоната кальция в аппаратах для подбора типов ингибиторов, доз ингибитора и типов мембран с целью минимизировать эксплуатационные затраты мембранных установок. При использовании нанофильтрационных мембран сокращаются затраты на электроэнергию, поскольку нанофильтрационные мембраны работают при пониженных значениях давления [20-22].



**Рис.5.** Влияние выбранного типа мембран на скорость осадкообразования в мембранных аппаратах. Рабочее давление - 16 Бар, имитаты 1 и 2 (Таблица 1).

1 - имитат 1, без добавления ингибитора, мембраны BLN; 2 - имитат 1, без добавления ингибитора, мембраны 90 NE; 3 - имитат 1, без добавления ингибитора, мембраны 70 NE; 4 - имитат 2, с добавлением ингибитора, мембраны BLN; 5 - имитат 2, с добавлением ингибитора, мембраны 90 NE; 6 - имитат 1, с добавлением ингибитора, мембраны BLN; 7 - имитат 1, с добавлением ингибитора, мембраны 90 NE; 8 - имитат 2, с добавлением ингибитора, мембраны 70 NE; 9 - имитат 1, с добавлением ингибитора, мембраны 70NE.

**Fig. 5.** The influence of membrane type on scaling rates in membrane modules. Pressure - 16 Bars, the artificial 1 and 2 (Table 1).

1 - the artificial 1, without antiscalant addition, BLN membranes; 2 - the artificial 1, without antiscalant addition, 90 NE membranes; 3 - the artificial 1, without antiscalant addition, 70 NE membranes; 4 - the artificial 2, with antiscalant addition, BLN membranes; 5 - the artificial 1, with antiscalant addition, 90 NE membranes; 6 - the artificial 1, with antiscalant addition, BLN membranes; 7 - the artificial 1, with antiscalant addition, 90 NE membranes; 8 - the artificial 2, with antiscalant addition, 70 NE membranes; 9 - the artificial 1, with antiscalant addition, 70 NE membranes.

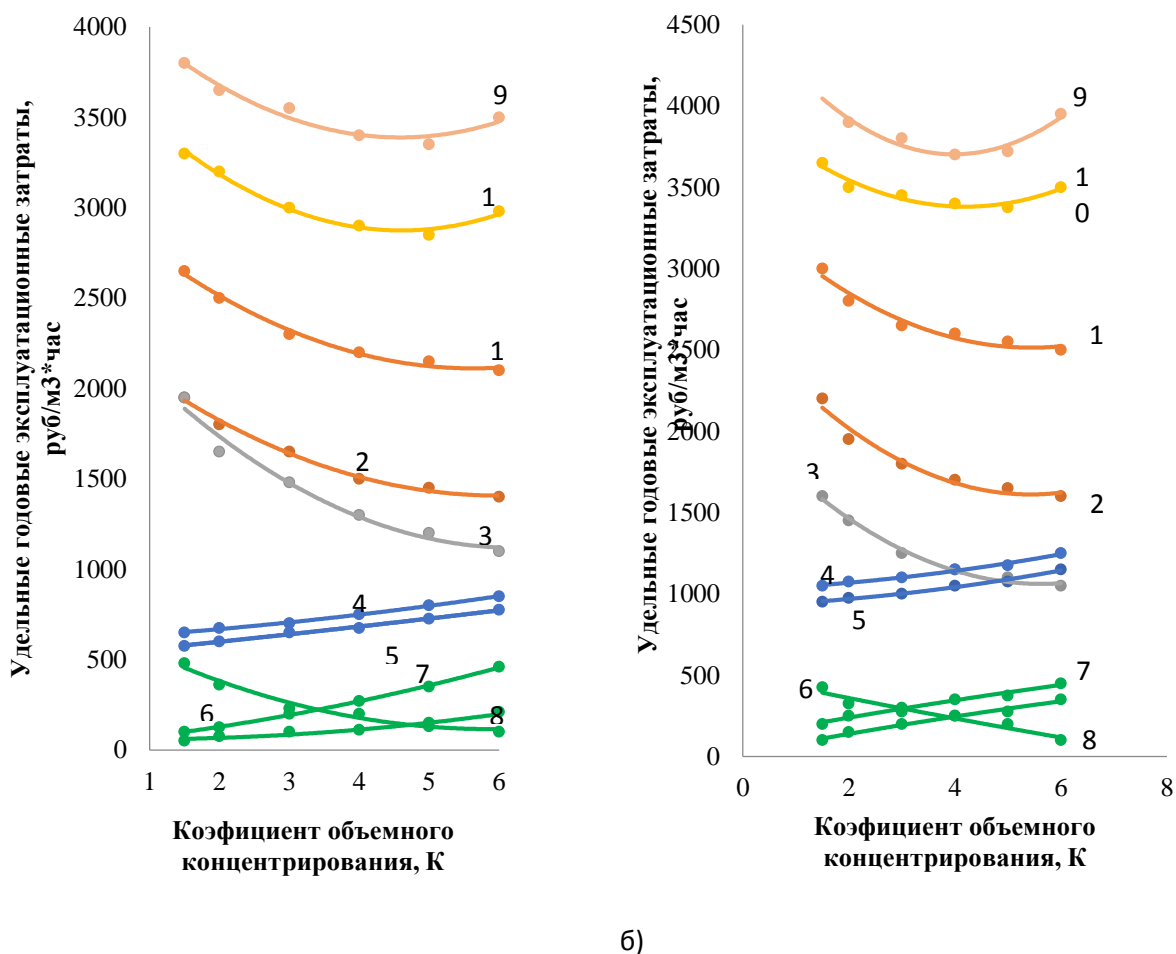
Определение составов воды, очищенной с применением обратноосмотических мембран в зависимости от выбранных величин рабочего давления и выхода фильтрата, может производиться по программам компьютерного расчета [1,20]. Также в зависимости от состава исходной воды программы рекомендуют время работы установки до проведения химических промывок и расходы сервисных реагентов – ингибиторов и моющих растворов [2-4,20].

Результаты проведенных в настоящей работе исследований позволяют обосновать возможность снижения дозы ингибитора по сравнению с величиной, рекомендуемой многими фирмами-

поставщиками мембранных установок. Кроме того, подбор характеристик мембран позволяет не только получить качественную питьевую воду, но и снизить величину затрат на проведение химических промывок.

Для экономического обоснования разработанных авторами рекомендаций на рис.6 представлены примеры определения величины удельных эксплуатационных затрат в зависимости от выбранной величины К для производства воды питьевого качества из имитата 1 (рис. 6,а) и имитата 2 (рис. 6,в). Составы имитатов представлены в Таблице 1. В зависимости от типа применяемых мембран изменяются скорости образования осадка,

благодаря чему уменьшаются дозы ингибиторов, расходы мощных реагентов, а также расходы электроэнергии.



**Рис.6.** Изменение величины эксплуатационных затрат в зависимости от выбранного типа мембран:

а) затраты при опреснении имитата 1 ( Табл.1);

б) затраты при опреснении имитата 2 (Табл.1);

1 - затраты на электроэнергию при использовании мембран BLN; 2 - затраты на электроэнергию при использовании мембран 90NE; 3 - затраты на ингибитор при использовании мембран BLN; 4 - затраты на замену мембран 90 NE; 5 - затраты на замену мембран BLN; 6 - затраты на ингибитор при использовании мембран 90NE; 7 - затраты на химические промывки при использовании мембран BLN; 8 - затраты на промывки при использовании мембран 90 NE; 9 - годовые эксплуатационные затраты (удельное значение) при использовании мембран BLN; 10 - годовые эксплуатационные затраты (удельное значение) при использовании мембран 90NE.

**Fig. 6.** Dependencies of operational costs on membrane type used for desalination of well water:

а) desalination of the Artificial 1 (Table 1);

б) desalination of the Artificial 2 (Table 1);

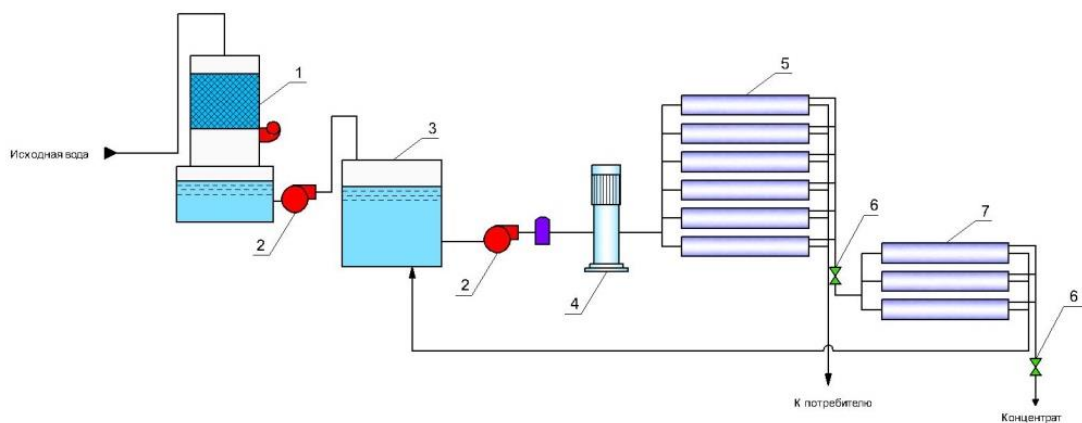
1 - power costs if BLN membranes are used; 2 - power costs when 90NE membranes are used; 3 - antiscalant costs when BLN membranes are used; 4 - 90 NE membranes replacement costs; 5 - BLN membranes replacement costs; 6 - antiscalant costs if 90 NE membranes are used; 7 - BLN membrane cleaning costs; 8 - 90 NE membrane cleaning costs; 9 - the specific total operational costs value (roubles per year / cubic meter per hour) if BLN membranes are used; 10 - the specific total operational costs value (roubles per year / cubic meter per hour) if 90 NE membranes are used.

Сокращение расхода концентрата является важной задачей при использовании мембранных установок [18,19]. Чем больше расход концентрата, т.е. чем меньше величина выхода фильтрата установок, тем меньше оказывается величина пересыщения по карбонату кальция. Применение ингибиторов для контроля осадкообразования полностью не предотвращает, а лишь уменьшает скорость осадкообразования [9-17].

Наличие сбросных расходов концентратов создает серьезные проблемы при использовании мембранных установок для целей питьевого водоснабжения. Решение проблемы сокращения расхода концентрата и его утилизации позволит значительно сократить расходы на очистку воды [18,19].

В [20,21] были описаны разработки кафедры водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ для сокращения расходов воды на собственные нужды мембранных установок. Для уменьшения расхода концентрата в новых разработках используются

специальные дополнительные мембранные аппараты второй ступени. Аппараты второй ступени используются для снижения расхода концентрата еще в 3-4 раза по сравнению с расходом концентрата при выходе фильтрата 0,67. Таким образом, расход концентрата составит не более 5-10 % от расхода исходной воды, что соответствует расходу воды на собственные нужды установок обезжелезивания. Технологическая схема применения мембранной установки с утилизацией концентрата показана на рис. 7. В соответствии с разработанной технологией, концентрат после опреснительной установки проходит обработку с применением нанофильтрационных мембран. При этом фильтрат нанофильтрационных мембран смешивается с исходной водой и поступает в опреснительную установку. Применение нанофильтрационных мембран, как уже говорилось выше [20], снижает риск образования отложений карбоната кальция в мембранных аппаратах.



**Рис.7.** Схема опреснения воды методом обратного осмоса с узлом утилизации концентрата.

1 - аэрактор; 2 - насос; 3 - механический фильтр; 4 - рабочий насос высокого давления; 5 - установка обратного осмоса; 6 - регулирующий давление вентиль; 7 - блок уменьшения расхода концентрата .

**Fig. 7.** The flow diagram of reverse desalination unit with reduced concentrate flow.

1 - aeration unit; 2 - pump; 3- filter; 4 - high pressure pump; 5 - reverse osmosis unit; 6 - pressure regulation valve; 7 - concentrate flow reduction unit.

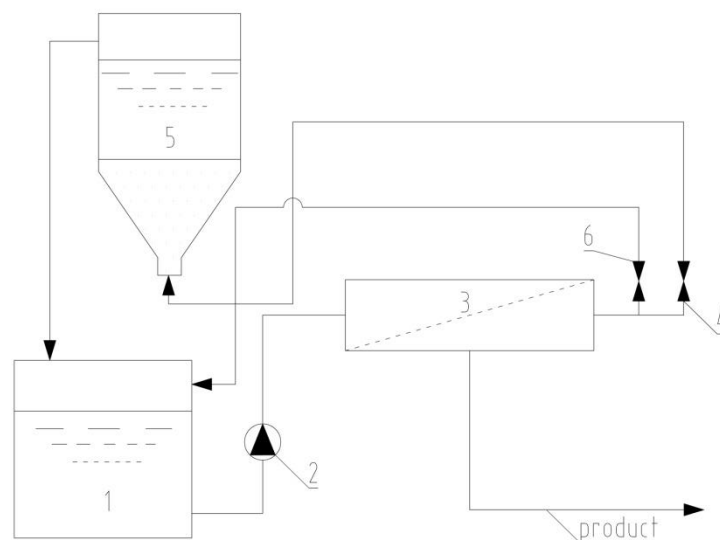
Таким образом, применение дополнительной ступени обработки концентрата позволяет снизить расход концентрата до величины, не превышающей 5-10% от расхода исходной воды, поступающей в опреснительную установку. Для дальнейшего уменьшения расхода концентрата (до величины, составляющей 0,5-1% от исходной воды) используется специально разработанная авторами технология, состоящая в пропуске концентрата через реактор, заполненный свежесформированными кристаллами карбоната кальция [21]. Принципы технологии снижения расхода концентрата показаны на рис. 8. При прохождении концентрата опреснительной установки через слой кристаллов

карбоната кальция происходит рост кристаллов карбоната кальция, при этом значения концентраций ионов кальция и бикарбонат-ионов в концентрате уменьшаются. Это дает возможность дальнейшей обработки концентрата с применением нанофильтрационных мембран без опасности интенсивного образования на мембранах карбоната кальция. В Таблице 2 представлены состав исходной воды (имитат 1), состав концентрата установки, а также составы концентрата после обработки с помощью дополнительной ступени [20] и после обработки с помощью реактора с кристаллами карбоната кальция [21].

**Таблица 2.** Составы исходной воды и концентрата установки с используемой системы сокращения расхода концентрата и его утилизации

**Table 2.** The composition of the source water and concentrate installation with the used system to reduce the consumption of concentrate and its disposal

Показатели	Водозабор	Фильтрат	Концентрат 1-ой ступени	Фильтрат 2-ой ступени	Концентрат 2-ой ступени	Концентрат после контакта с «затравкой»
Ca, мг-экв/л	7,6	0,6	31,04	4,2	71,3	50
Mg, мг-экв/л	2,3	0,15	5,5	0,8	612,5	60
Na, мг-экв/л	6,2	1,85	23,6	4,4	53,0	210
SO <sub>4</sub> , мг-экв/л	5,9	0,4	24,36	3,6	55,5	130
Cl, мг-экв/л	6,1	1,76	19,5	3,0	44,2	132
HCO <sub>3</sub> , мг-экв/л	4,1	0,44	16,28	2,8	36,5	63
S, мг-экв/л	1100	246	4510	860	1114	3300
Расходы м <sup>3</sup> /ч	125	100	25	15	10	2
Кол-во CaCO <sub>3</sub> , мг-экв						240
Кол-во CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O, мг-экв						90



**Рис.8.** Схема применения реактора с кристаллами карбоната кальция для снижения расхода концентрата установок обратного осмоса.

1 - бак исходной воды; 2 - рабочий насос высокого давления; 3 - обратноосмотический аппарат ; 4 - регулирующий давление вентиль; 5 - реактор с кристаллами; 6 - вентиль байпаса;

**Fig. 8.** A flow diagram of reduced concentrate flow membrane unit using calcium carbonate seed reactor.

1 - feed water tank; 2 - high pressure pump; 3 - reverse osmosis membrane module; 4 - pressure regulation valve.

Опреснение морской воды также требует решения ряда проблем. Для опреснения высокоминерализованной морской воды процесс обратного осмоса ведется традиционно при высоких значениях рабочего давления (30-50 Бар), что требует высокого расхода электроэнергии. Обратноосмотические мембраны плохо задерживают бор из морской воды, поэтому для того, чтобы опресненная вода соответствовала требованиям Всемирной Организации Здравоохранения (WHO), требуются дополнительные технологические приемы для удаления бора [22,23]. Бор в морской воде находится в виде борной кислоты, и эффективность очистки воды от бора зависит от величины pH: чем выше pH, тем лучше кислота диссоциирована и тем лучше задерживается мембранами бор. Однако, для увеличения pH

требуется подщелачивание воды, что связано с опасностью образования на мембранах кристаллических отложений карбоната кальция. Для предотвращения осадкообразования в исходную воду дозируются ингибиторы, в основном - соли фосфоновых кислот. Однако, в случае опреснения морской воды, наличие фосфора в концентратах мембранных установок, сбрасываемых в море, создают экологическую проблему загрязнения водоисточников биогенными элементами. Поэтому решением этой проблемы является разработка и применение новых "зеленых" ингибиторов, не содержащих фосфора и азота [23].

Для сокращения расходов электроэнергии на опреснение воды могут использоваться схемы обработки воды в две ступени (рис.9).

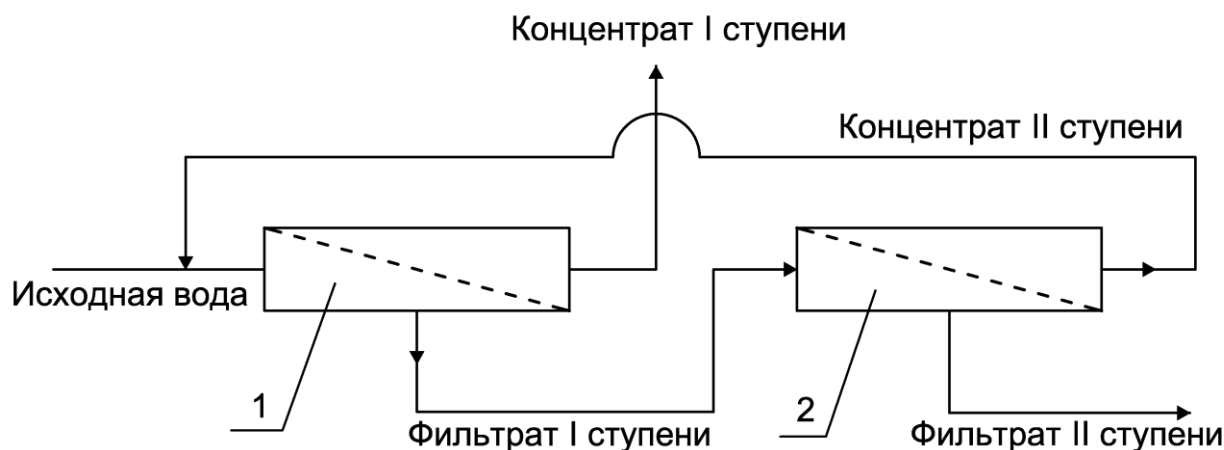


Рис. 9. Технологическая схема опреснения морской воды в две ступени.

1 - мембранный аппарат первой ступени; 2 - мембранный аппарат второй ступени; 3 - система подщелачивания; 4 - система дозирования ингибитора.

Fig. 9. A double-stage sea water desalination unit flow diagram.

1 - first stage membrane module; 2 - second stage membrane module; 3 - caustic addition unit; 4 - antiscalant dosing system.

В современных схемах опреснения морской воды на первой ступени часто используют нанофильтрационные мембраны, при этом солесодержание фильтрата первой ступени составляет 10-12 граммов на литр. Фильтрат первой ступени может быть обработан с помощью обратноосмотических мембран низкого давления на второй ступени опреснения. Благодаря этому сокращаются эксплуатационные затраты (снижаются расходы на электроэнергию), достигаются более высокие значения (вплоть до 50%) величины выхода фильтрата, на обеих ступенях используется оборудование низкого давления (насосы, трубопроводы, арматура, корпуса фильтров), что значительно сокращает капитальные затраты. Двухступенчатая схема опреснения морской При использовании двухступенчатой

схемы опреснения для повышения эффективности очистки воды от бора подщелачивание производится не исходной морской воды, а фильтрата первой ступени. Благодаря этому снижается риск образования карбонатных отложений на мембранах первой ступени.

Для проведения экспериментов использовались рулонные элементы с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами типа 4040 производства компании CSM (Корея). Для опреснения воды Черного моря с величиной солесодержания 18000 мг/л (Таблица 3) в одну ступень использовались мембраны среднего давления типа ВЕ. Величина рабочего давления для опреснения морской воды в одну ступень составляла 16 и 32 Бара.

Таблица 3. Химические составы растворов, используемых при испытаниях новых ингибиторов

Table 3. The chemical compositions of the solutions used in testing new inhibitors

		Na <sup>+</sup> , мг/л	Ca <sup>2+</sup> , мг/л	Mg <sup>2+</sup> , мг/л	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	Cl <sup>-</sup> , мг/л	TDS, мг/л
1	Вода московского водопровода	0,5	2,5	1,0	3,5	0,25	0,25	240-250
2	Имитат воды Черного моря	261	10,0	50,0	1,0	20,0	300,0	17-500
3	Имитат фильтрата морской воды (мембраны NE-90)	56,2	1,0	4,0	0,2	1,0	60	3600
4	Имитат фильтрата морской воды (мембраны BLN-90)	40,8	0,2	0,5	0,5	1,0	40	2400

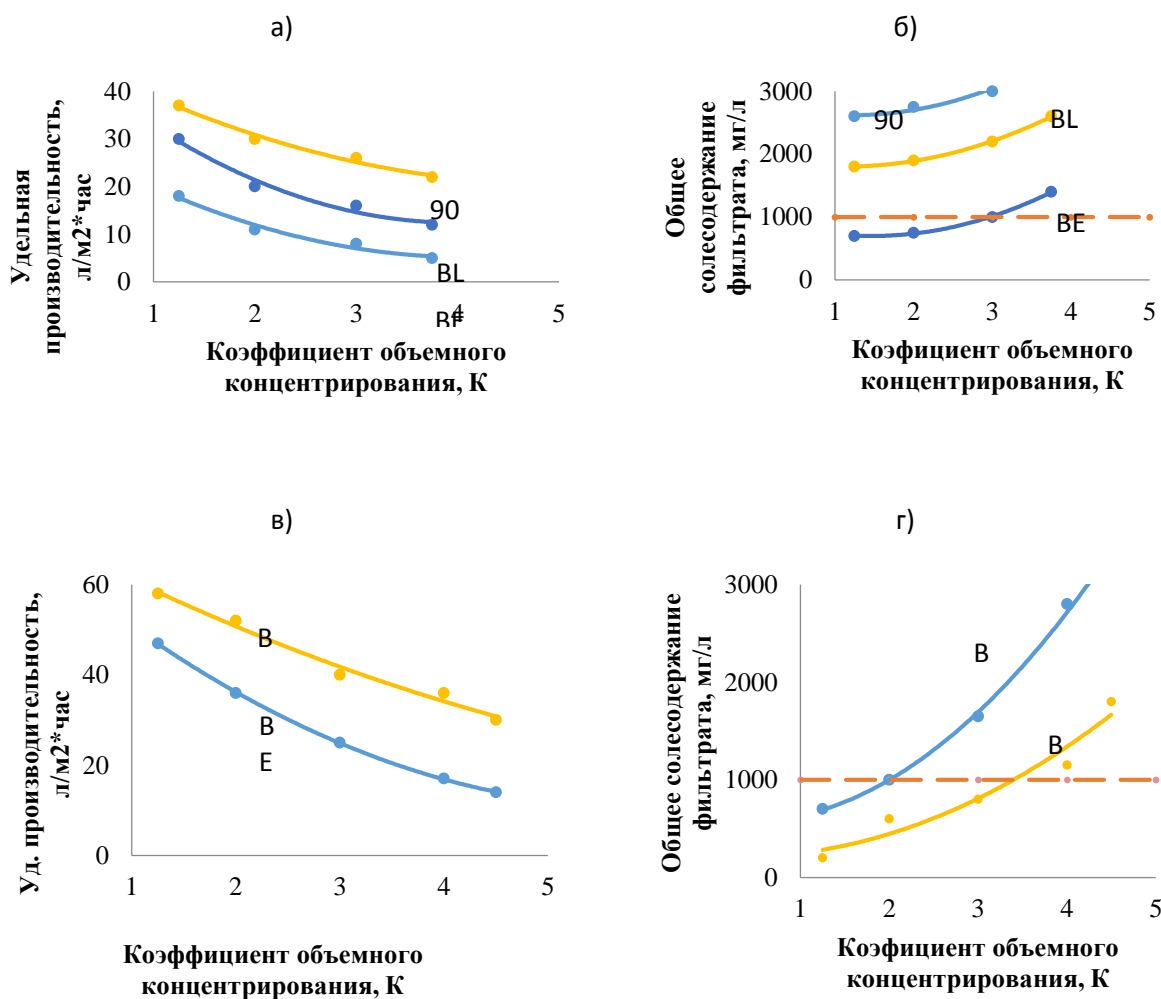


Рис.10. Изменение производительности и селективности различных мембран при опреснении морской воды и фильтрата первой ступени:

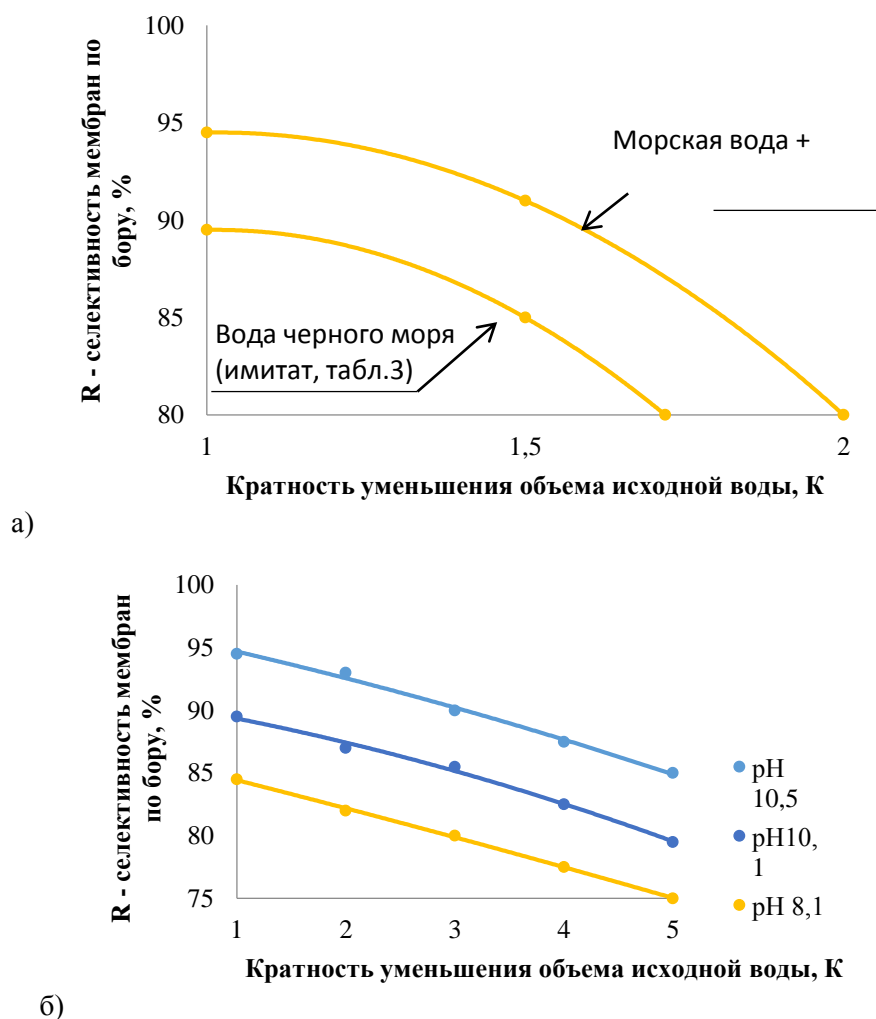
- а) - снижение удельной производительности мембран BLN, 90NE, и BE при опреснении морской воды в зависимости от величины K на первой ступени опреснения; б) - рост величины общего соле содержания фильтрата мембран BLN, 90NE и BE с ростом значения K на первой ступени опреснения;
- в) - снижение производительности мембран BLN и BE с ростом значения K на второй ступени при опреснении фильтрата первой ступени; г) - рост величины общего соле содержания фильтрата мембран BLN и BE с ростом значения K при опреснении фильтрата первой ступени.

Fig. 10. Dependencies of product flow and product quality on recovery values for desalination of Sea water and second stage product water with different membranes:

- a) reduction of BLN, 90 NE and BE membrane product flow versus K values on the first stage of desalination;
- б) increase of BLN, 90NE and BE membrane product TDS values versus K values on the first stage of desalination;
- в) reduction of BLN and BE membrane product flow values with K value increase on the second stage of desalination; г) the increase of BLN and BE membrane product TDS values with K value increase on the second stage of desalination.

При опреснении морской воды в две ступени на первой ступени опреснения использовались мембранные элементы 4040 NE с нанофильтрационными мембранами и мембранные элементы типа 4040 BLN с низконапорными обратноосмотическими мембранами. Величина рабочего давления на первой и на второй ступени составляла 16 Бар. На второй ступени опреснения использовались мембранные элементы 4040 BLN. Для определения всех видов эксплуатационных затрат необходимо знать величины удельной производительности мембран и величины выхода фильтрата на обеих ступенях очистки, а также скорости осадкообразования в мембранных элементах. На рис.10 (а) представлены кривые снижения удельной производительности

мембран BE, BLN и 90 NE при обработке морской воды и фильтрата первой ступени в зависимости от величины К (коэффициента концентрирования). На рис. 10 (б) показаны изменения солесодержания фильтрата при обработке воды Черного моря с применением мембран BE, BLN и 90 NE в зависимости от величины К. На рис.10 (в,г) представлены зависимости величин удельной производительности и общего солесодержания фильтрата при обработке фильтрата первой ступени с применением мембран BLN и NE 90 от величины К. С помощью графиков на рис.10 были определены технические характеристики мембранных установок, по которым рассчитывались затраты на электроэнергию, реагенты и мембраны.



**Рис.11.** Изменение эффективности очистки воды от бора в зависимости от значения pH исходной воды и величины К:

- а) - зависимости величины селективности мембран по бору от величины К при обработке морской воды в одну ступень с применением мембран BE при давлении 16 Бар с подщелачиванием и без; б) - зависимости селективности мембран BLN по бору от величины К при давлении 16 Бар, при различных значениях pH при обработке фильтрата первой ступени, полученного с применением мембран 90 NE.

**Fig. 11.** Dependencies of Boron removal efficiency on pH and K values.

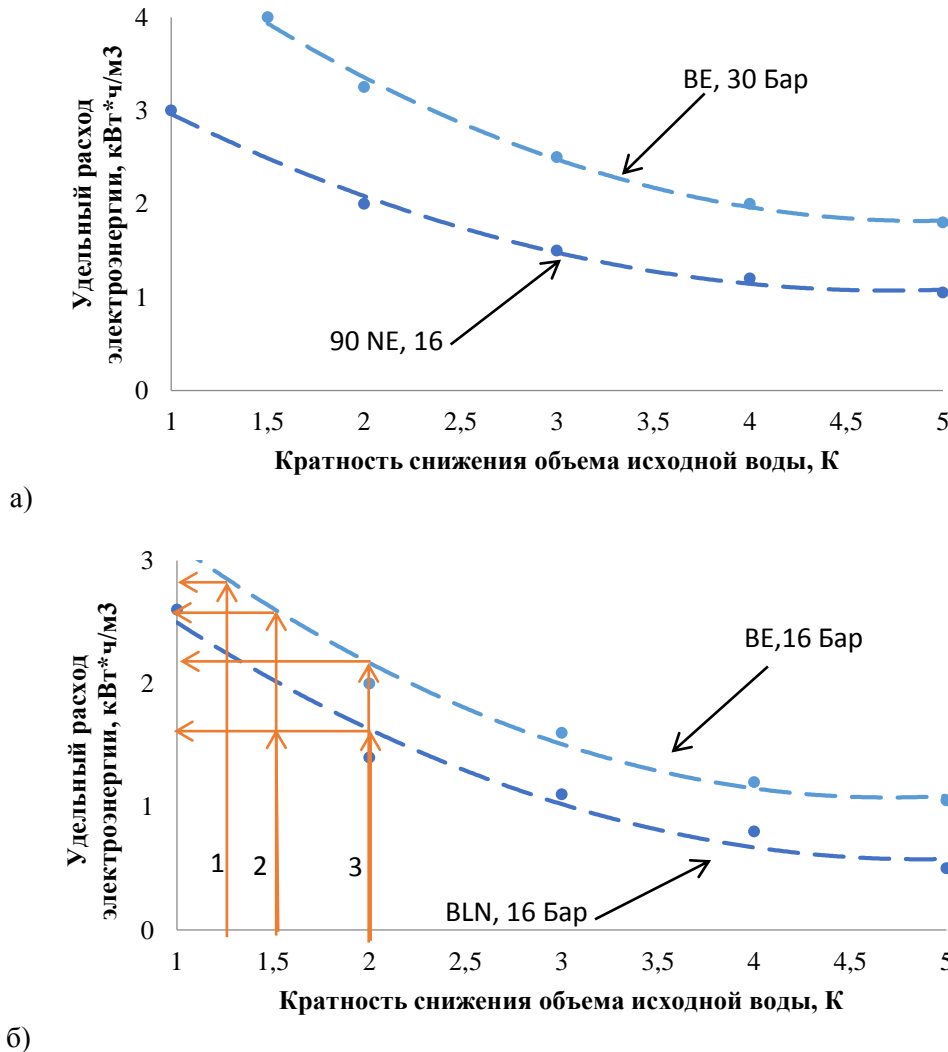
- а) Boron rejection values versus K during sea water treatment ( BE membranes, 16 Bars, first stage) with and without caustic addition;
- б) Boron rejection values versus K at different pH values on the second stage when the first stage product is treated (90 NE membranes, 16 Bars).

Выбор величины выхода фильтрата на каждой ступени зависит от селективности по иону  $H_2BO_3^-$ . На рис.11 представлены зависимости селективности мембран по бору от величины pH исходной воды [22,23]. На рис.11 (а) показаны зависимости селективности мембран по бору от К при обработке морской воды в одну ступень, а на рис.11 (б) - зависимости селективности от К для случаев обработки фильтрата первой ступени, полученного с помощью мембран NE, с применением мембран BLN при различных значениях pH исходной воды. От величины pH воды зависят качество очищенной воды и величина выхода фильтрата.

Чем выше величина выхода фильтрата, тем меньше затраты электроэнергии на производство очищенной воды на первой и второй ступенях опреснения (рис.12). Однако, с увеличением значения pH возрастает опасность образования на мембранах отложений карбоната кальция и быстрое снижение производительности мембран. Поэтому

от эффективности применяемого ингибитора зависят другие виды эксплуатационных затрат - расходы на проведение химических промывок мембран от отложений карбоната кальция. На рис.13 показаны результаты определений скоростей роста осадка карбоната кальция в мембранных аппаратах на первой и второй ступенях опреснения в зависимости от значений К, pH и типов применяемых мембран.

Для определения всех видов эксплуатационных затрат необходимо знать величины удельной производительности мембран и величины выхода фильтрата на обеих ступенях опреснения (рис.12), а также скорости осадкообразования в мембранных аппаратах на первой и второй ступенях опреснения (рис.13). На рис.12 показаны зависимости значений удельного расхода электроэнергии от величины К в зависимости от типов мембран, применяемых на первой (рис.12,а) и второй (рис.12,б) ступенях опреснения.



**Рис. 12.** Зависимости значений удельного расхода электроэнергии от величины К в зависимости от типов применяемых мембран:

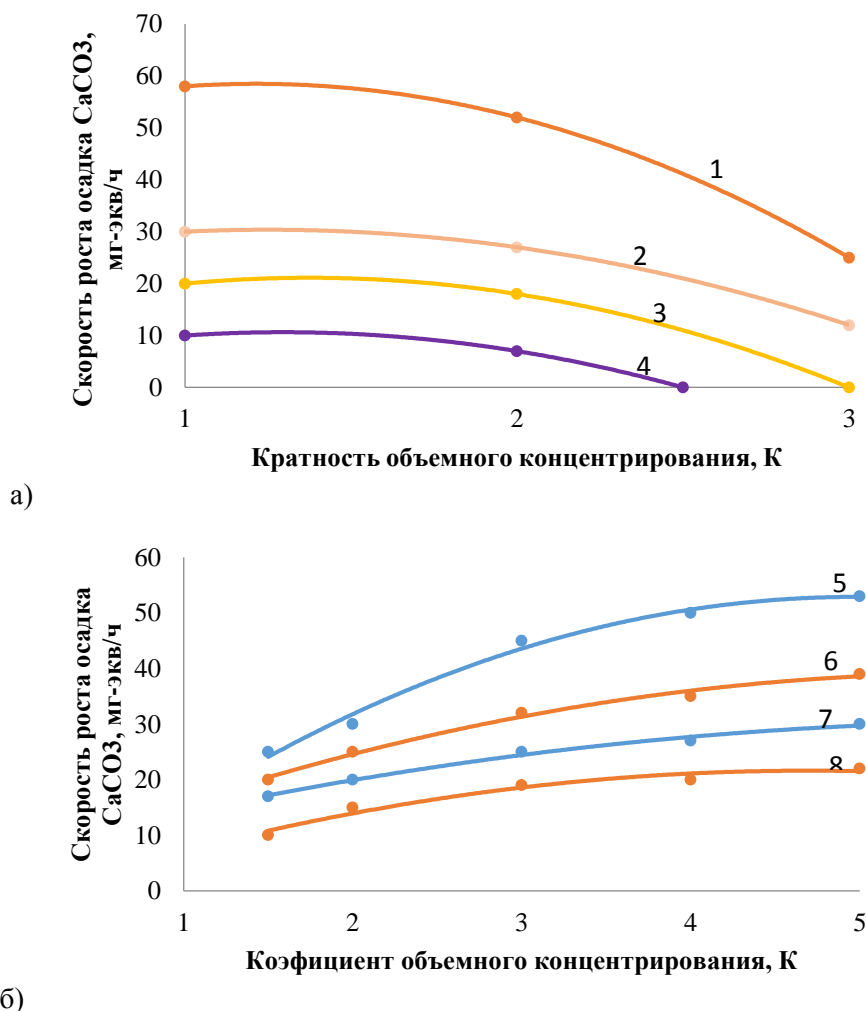
а) - на первой ступени опреснения; б) - на второй ступени опреснения.

**Fig. 12.** Dependencies of power specific consumption values (Kilowatt per cubic meter) on K values for different membranes used:

а) on the first stage; б) on the second stage.

На рис. 13 представлены результаты определения скоростей образования карбоната кальция в мембранных аппаратах первой ступени (рис. 13,а) и на второй ступени опреснения (рис.13,б). Определение скоростей роста осадка проводилось при использовании различных мембран, при использовании различных

ингибиторов и при подщелачивании морской воды. На рис. 13 (б) представлены результаты определения скоростей образования осадка карбоната кальция на второй ступени опреснения при подщелачивании воды при использовании ингибиторов Аминат-К и ПАСП.



**Рис.13.** Результаты определения скоростей образования карбоната кальция на первой и на второй ступенях опреснения в зависимости от марки применяемого ингибитора и значения pH:

а) - на первой ступени опреснения при использовании мембран BE при давлении 16 Бар;

б) - на второй ступени опреснения при использовании мембран BLN и с дозированием ингибиторов Аминат-К и ПАСП;

1 - морская вода с добавлением NaOH ( pH = 8,9), без добавления ингибитора; 2 - морская вода с добавлением NaOH (pH = 8,8) с дозированием ингибитора Аминат-К; 3 - морская вода без дозирования ингибитора; 4 - морская вода с добавлением ингибитора Аминат-К; 5 - фильтрат первой ступени с добавлением NaOH ( pH = 8,9) и с дозированием ингибитора ПАСП; 6 - фильтрат первой ступени с добавлением NaOH ( pH = 8,8) и с дозированием ингибитора Аминат-К; 7 - фильтрат первой ступени ( pH =7,7) с дозированием ингибитора ПАСП; 8 - фильтрат первой ступени ( pH=7,7) с дозированием ингибитора Аминат-К.

**Figure 13.** Results of calcium carbonate scaling rate evaluation for different antiscalants used and for different pH values:

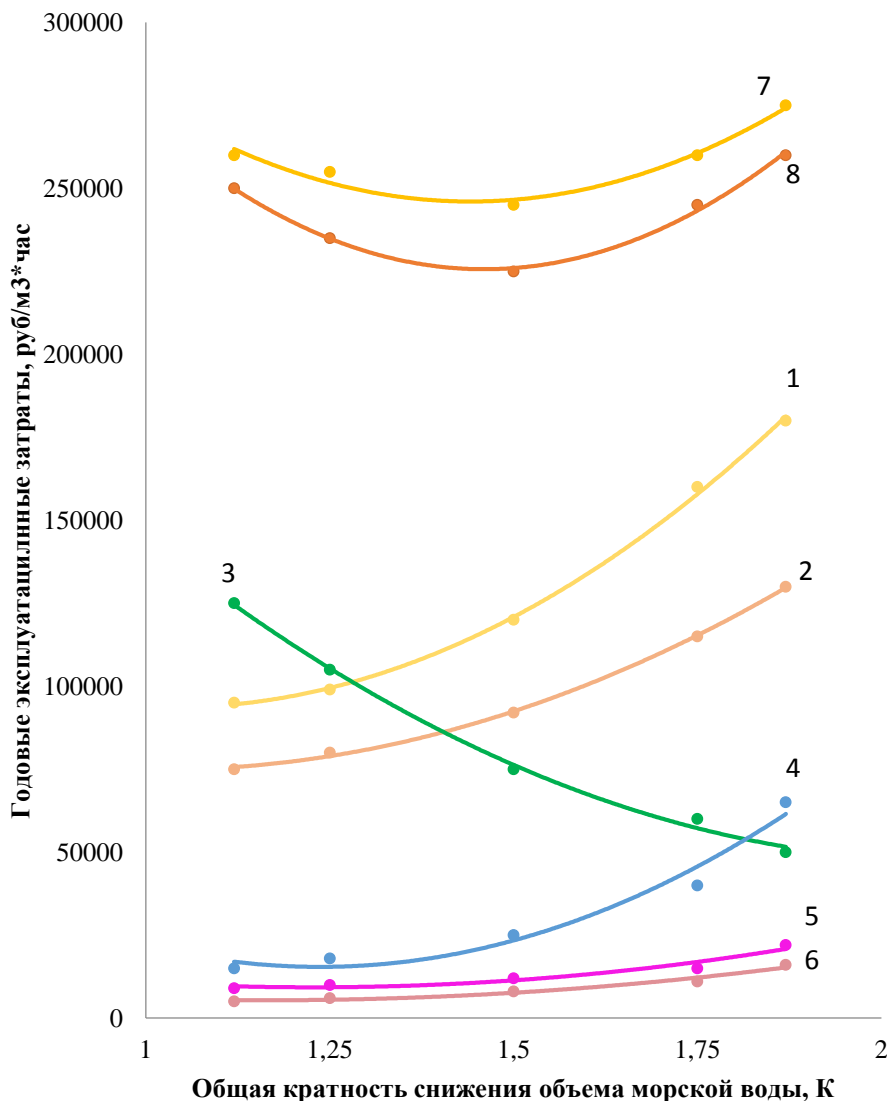
a) on the first stage with BE membranes ( pressure 16 Bars);

b) on the second stage with BLN membranes with "Aminat-K" and PASP antiscalants.

1- Sea water with caustic addition (pH= 8,9) without antiscalant addition; 2 - Sea Water with caustic addition (pH = 8,8) with "Aminat-K" dosing; 3 - Sea water without antiscalant addition; 4 - Sea water with "Aminat-K" addition; 5 - first stage product water with caustic addition ( pH = 8,9) and with PASP addition; 6 - first stage product water with caustic addition (pH= 8,8) and with "Aminat-K" addition; 7 - first stage product water (pH = 7,7) with PASP addition; 8 - first stage product water (pH = 7,7) with "Aminat-K" addition.

Оптимизация (выбор условий работы установки с минимальными затратами) ведется на основе сопоставления всех видов эксплуатационных затрат - величин доз ингибитора и подщелачивания, расходов моющих реагентов и электроэнергии, затрат на замену мембран (рис.14 ). На рис. 14 показан пример определения зависимости значения

эксплуатационных затрат от значения К и выбор оптимального значения К, соответствующего минимальному значению эксплуатационных затрат. Как следует из рис.14, эффективность ингибитора оказывает существенное значение на величину эксплуатационных затрат.



**Рис.14.** Влияние выбранного типа ингибитора на величину годовых эксплуатационных затрат при опреснении воды в зависимости от величины К при использовании двухступенчатой схемы: на первой ступени - мембраны 90 NE, на второй ступени - мембраны BLN.

1 - затраты на ингибитор ПАСП; 2 - затраты на ингибитор Аминат-К; 3 - общие затраты на электроэнергию; 4 - затраты на замену мембран (1 раз в 5 лет); 5 - затраты на проведение химических промывок при использовании ингибитора ПАСП; 6 - затраты на проведение химических промывок при использовании ингибитора Аминат-К; 7 – общие эксплуатационные ПАСП; 8 – Общие эксплуатационные затраты при использовании Аминат К.

**Fig. 14.** The influence of antiscalant type on the total operational costs value: total operational costs versus K (double-stage flow diagram, first stage - 90 NE membranes, second stage - BLN membranes).

1 - PASP antiscalant costs; 2 - "Aminat-K" antiscalant costs; 3 - power costs; 4 - membrane replacement costs (once in 5 years); 5 - chemical cleaning costs if PASP is used; 6 - chemical cleaning costs if "Aminat-K" is used; 7 - total operating costs if PASP is used; total operating costs if "Aminat-K" is used.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ эксплуатационных затрат опреснительных установок показывает, что от эффективности применяемых ингибиторов предотвращения осадков малорастворимых солей зависят не только затраты на сервисные реагенты, но и расходы на электроэнергию за счет увеличения выхода фильтрата.
2. От типа применяемых мембран и показателей их селективности зависит не только качество опресненной воды, но и сумма эксплуатационных затрат.
3. Снижение расхода концентрата – главное направление исследований, включающее подбор ингибиторов и мембран, обеспечивающих минимальное значение скоростей осадкообразования.
4. Необходимость применения ингибиторов при опреснении морской воды обусловлена подщелачиванием опресняемой воды и опасностью образования в мембранных аппаратах осадков малорастворимых солей карбоната кальция.

*Благодарности: авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку работы (грант РФФИ № 19-08-00982 А).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production, V. 1, pp. 61-70, ISBN 0-86689-060-2, October 2000, Desalination Publications, L'Aquila, Italy.
2. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // Desalination. 2014. V. 354. Pp. 30-38.
3. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies // Desalination. 2018. V. 425. Pp. 130-155.
4. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // Science Total Environ. 2017. V. 595. Pp. 567-583.
5. Pena Garcia N., Rodriguez J., del Vigo F., Armstrong M., Fazel M., Chesters S. Results of a neutral pH cleaner that removes complex fouling and metals from membranes // The international Desalination Association World Congress - Sao Paolo, Brasil. REF: IDA 17 WC-37930\_PENA 9. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control scaling deposition in desalination plant // Desalination, 2015, v. 356, pp. 294-313.
6. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO<sub>4</sub> scaling on RO membranes // Desalination. 2018. V. 431. Pp. 119-125.
7. Borden J., Gilron J., Hasson D. Analysis of RO flux decline due to membrane surface blockage // Desalination. 1987. V. 66. P. 257-269.
8. Okazaki M., Kimura S. Scale Formation on Reverse Osmosis Membranes // Journal of Chemical Engineering of Japan. 1984. V. 17 (2). Pp. 145-151.
9. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control deposition in desalination plant // Desalination, 2015, v. 356, pp. 294-313.
10. Turek M., Mitko K., dYDO p., Laskovska E., Jacobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // Desalination, 2017, v. 401, pp. 180-189.
11. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Hubert L., Ledion J., Cheap-Charpentier H., Horner O. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // Desalination. 2015. V. 356. P. 47-55.
12. Al-Roomi Y.M., Hussain K.F. Potential kinetic model of scaling and scale inhibition mechanism // Desalination. 2016. V. 393. Pp. 186-195.
13. Liu D., Dong W., Hiu F., Ledion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods // Desalination. 2014. V. 304. Pp. 1-10.
14. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // Desalination. 2017. V. 404. Pp. 224-229.
15. Yangali-Quintanilla V.A., Dominiak D.M., van de Ven W. A smart optimization of antiscalant dosing in water // The International Desalination Association World Congress - Sao Paolo, Brazil, REF: IDA17WC-58252\_Yangali-Quintanilla.
16. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO<sub>3</sub> scaling in reverse osmosis plants // Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57. Pp. 48-49.
17. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // Desalination. 2017. V. 404. Pp. 224-229.
18. Veepareni S., Bond R. Getting this last drop: new technology for treatment of concentrate // Tianjin IDA World Congress 2013 on Desalination and Water Reuse, October 20-25, China 2013, TIAN 13-357.
19. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jacobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // Desalination, 2017, v. 401, pp. 180-189.
20. Pervov A.G. A simplified RO process design based on understanding of fouling mechanisms // Desalination, 1999, V.126, pp.227-247.

21. Pervov A. Precipitation of calcium carbonate in reverse osmosis retentate flow by means of seeded techniques – a tool to increase recovery // *Desalination*. 2015. V. 368. Pp. 140-151.

22. Pervov A.G., Andrianov A.P. A new solution for Caspian Sea desalination: low pressure membranes// *Desalination*. V/157, pp. 377-384.

23. Pervov A., Andrianov A., Rudakova G., Popov K. A comparative study of some novel "green" and traditional antiscalants efficiency for the reverse osmotic Black Sea water desalination // *Desalination and Water Treatment*. 2017. V. 73. Pp. 11-21.

## REFERENCES

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // *Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production*, V. 1, pp. 61-70, ISBN 0-86689-060-2, October 2000, Desalination Publications, L'Aquila, Italy.

2. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // *Desalination*. 2014. V. 354. Pp. 30-38.

3. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies // *Desalination*. 2018. V. 425. Pp. 130-155.

4. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science Total Environ*. 2017. V. 595. Pp. 567-583.

5. Pena Garcia N., Rodriguez J., del Vigo F., Armstrong M., Fazel M., Chesters S. Results of a neutral pH cleaner that removes complex fouling and metals from membranes // *The international Desalination Association World Congress - Sao Paulo, Brasil*. REF: IDA 17 WC-37930\_PENA 9. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control scaling deposition in desalination plant // *Desalination*, 2015, v. 356, pp. 294-313.

6. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO<sub>4</sub> scaling on RO membranes // *Desalination*. 2018. V. 431. Pp. 119-125.

7. Borden J., Gilron J., Hasson D. Analysis of RO flux decline due to membrane surface blockage // *Desalination*. 1987. V. 66. P. 257-269.

8. Okazaki M., Kimura S. Scale Formation on Reverse Osmosis Membranes // *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1984. V. 17 (2). Pp. 145-151.

9. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control deposition in desalination plant // *Desalination*, 2015, v. 356, pp. 294-313.

10. Turek M., Mitko K., dYDO p., Laskovska E., Jacobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // *Desalination*, 2017, v. 401, pp. 180-189.

11. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Hubert L., Ledion J., Cheap-Charpentier H., Horner O. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // *Desalination*. 2015. V. 356. P. 47-55.

12. Al-Roomi Y.M., Hussain K.F. Potential kinetic model of scaling and scale inhibition mechanism // *Desalination*. 2016. V. 393. Pp. 186-195.

13. Liu D., Dong W., Hiu F., Ledion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods // *Desalination*. 2014. V. 304. Pp. 1-10.

14. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // *Desalination*. 2017. V. 404. Pp. 224-229.

15. Yangali-Quintanilla V.A., Dominiak D.M., van de Ven W. A smart optimization of antiscalant dosing in water // *The International Desalination Association World Congress - Sao Paulo, Brazil*, REF: IDA17WC-58252\_Yangali-Quintanilla.

16. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO<sub>3</sub> scaling in reverse osmosis plants // *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57. Pp. 48-49.

17. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // *Desalination*. 2017. V. 404. Pp. 224-229.

18. Veesporeni S., Bond R. Getting this last drop: new technology for treatment of concentrate // *Tianjin IDA World Congress 2013 on Desalination and Water Reuse*, October 20-25, China 2013, TIAN 13-357.

19. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jacobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // *Desalination*, 2017, v. 401, pp. 180-189.

20. Pervov A.G. A simplified RO process design based on understanding of fouling mechanisms // *Desalination*, 1999, V.126, pp.227-247.

21. Pervov A. Precipitation of calcium carbonate in reverse osmosis retentate flow by means of seeded techniques – a tool to increase recovery // *Desalination*. 2015. V. 368. Pp. 140-151.

22. Pervov A.G., Andrianov A.P. A new solution for Caspian Sea desalination: low pressure membranes// *Desalination*. V/157, pp. 377-384.

23. Pervov A., Andrianov A., Rudakova G., Popov K. A comparative study of some novel "green" and traditional antiscalants efficiency for the reverse osmotic Black Sea water desalination // *Desalination and Water Treatment*. 2017. V. 73. Pp. 11-21.

UDK 66.081.63

MODERN SOLUTIONS TO DESALINATE SEA AND WELLWATER TO REDUCE POWER CONSUMPTION AND CONCENTRATE UTILIZATION

A.G. Pervov<sup>1</sup>, A.P. Andrianov<sup>1</sup>, V.A. Golovesov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU), Russia, 129997, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26, e-mail: PervovAG@mgsu.ru

**Summary.** Presented are results of research conducted to investigate possibilities to implement desalination and potable water supply in Crimea area. The approach is described that is based on application of sea and well water desalination units to supply water small communities, farms, industries etc. Results of research conducted throughout last 30 years are presented that were aimed at desalination techniques improvement, reduction of operational costs and concentrate effluents utilization.

**Subject:** well water with different chemical compositions and Black Sea water were investigated. Water TDS, boron and hardness reduction opportunities were evaluated. Power and chemical costs were determined. Research was conducted to investigate possibilities to predict concentrate flow values and chemical compositions as well as to radically reduce concentrate discharge.

**Materials and methods:** Experimental data was obtained to evaluate sparingly soluble salts scaling rates on membranes, power consumption and costs of reagents required to control scaling and power costs. Basing on experimental results, membrane units design techniques are developed that provide operational characteristics with respect to optimum costs for energy and reagents. Research was conducted using commercial industrial membrane elements with different characteristics (manufactured by CSM Company, Korea). Experimental plots are presented that demonstrate membrane performance on recovery, feed water hardness and TDS values as well as scaling rates in different membrane modules tailored with different membranes.

**Conclusions:** The obtained results enable us to evaluate operational costs and influence of TDS, hardness and boron concentration values as well as types of membranes and chemicals on membrane performance and to propose optimum values of desalination process parameters (such as: pressure, recovery) when membrane unit is designed and developed.

**Key words:** reverse osmosis; well water desalination; sea water desalination; sparingly soluble salts scaling; antiscalants; boron rejection during desalination; utilization of concentrates of desalination units.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНО - ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В СВИНАРНИКЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОДЕРЖАНИЯ ЖИВОТНЫХ

Федюшко Ю.М.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»  
295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4  
e-mail: Fedushko26@rambler.ru

**Аннотация.** В данной статье описаны результаты исследования технологического оборудования по созданию микроклимата в свинарнике.

**Ключевые слова:** микроклимат, математическая модель, приборы, зависимости.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Эффективность животноводства и рентабельность этой области сельского хозяйства зависит в обеспечении заданного микроклимата в помещении для содержания животных. Организм животного имеет способность поддерживать температуру тела на уровне оптимальной биологической активности. Однако это возможно лишь в том случае, когда количество энергии, которую получает животное с кормом, в общем энергетическом балансе организма будет отвечать количеству тепловой энергии, которую необходимо отдать в окружающую среду. Микроклимат помещения должен отвечать стойкой термодинамической системе тепловлагообмена животного с окружающей средой. Системы обогрева помещения должны обеспечивать заданную температуру и влажность внутреннего воздуха, который в свою очередь, создает условия необходимого конвективного теплообмена животного с окружающей средой. Термическое сопротивление ограждающих конструкций должно быть таким, чтобы радиационная температура в помещении не превышала лучистый теплообмен животного выше допустимого. Системы вентиляции должны поддерживать в помещении такую относительную влажность, чтобы влагообмен животных находился в допустимых границах. Такой комплексный подход к решению задачи микроклимата с соответствующими экономическими обоснованиями принятых решений обеспечит максимальную производительность, которую можно получить за счет действия этого фактора.

**Решения проблемы состоит** комплексной оценке искусственных экологических систем животноводческих помещений

**Анализ работы аналогичных конструкций и приборов.**

Исследование ученых показывают, что основным фактором в производстве продукции животноводства есть кормовой фактор - до - 50-60%, породистость и селекция могут влиять на производительность - до - 20%, а микроклимат (то есть искусственные экологические системы) могут повысить выход продукции на 30% [1,2].

**Целью работы** является исследование температурно-влажностного режима в свинарнике при использовании электрокалориферных установок.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

Для повышения производительности животных и создания оптимальных условий для их жизнедеятельности, в помещениях для их содержания, необходимо постоянно поддерживать в соответствующей норме параметры температуры, относительной влажности воздуха, подвижность воздуха, его газовый состав, запыленность, наличие микроорганизмов, освещение, давление и т.п. [1]. Кроме этих факторов на микроклимат помещения влияют температура поверхности ограждающих конструкций, величина лучистого теплообмена между ограждающими конструкциями и животными, условия содержания животных, тип кормления и от климатических условий местности.

Нормативные параметры воздуха рассчитываются для зоны размещения животных, то есть для пространства высотой до 1 м над уровнем пола или площадки, на которой они могут находиться. Подача приточного воздуха в свинарник должна составлять в холодный период в среднем 30 м<sup>3</sup> /ч, на 100 кг живой массы свиней. При этом скорость движения воздуха в помещениях для супоросных и подсосных маток с приплодом, не должна превышать 0,15 м/с, в помещениях для холостых и супоросных маток и хряков, а также в свинарниках - откормочниках - 0,3 м/с, для

ремонтного молодняка и поросят- отъемышей - 0,2 м/с. Допустимый уровень шума в животноводческих помещениях от работающего отопительно-вентиляционного оборудования - не выше 70 дБ [3].

Концентрация вредных газов в помещении для удержания животных не должна превышать: углекислого газа 0,2 %, аммиака 0,02 мг/л, сероводорода 0,015 мг/л.

Для обогрева поросят-отъемышей рекомендуется использовать специальные системы локального обогрева (обогрев пола, лучистый обогрев). Площадь обогреваемого пола в станке для подсосных маток рекомендуется принимать от 1 до 1,5 м<sup>2</sup>, а температуру обогреваемого пола 28 ± 2 °С.

Ориентировочные нормативы электрического обогрева для поросят-сосунов следующие: установленная мощность на 1 м<sup>2</sup> площади пола станков, при обогреве панелями пола 120...150Вт, инфракрасными излучателями или лампами накаливания - 150 Вт.

Проектировщики часто встречаются со сложностями при проектировании или реконструкции свинарников: Например, в холодный период года на 1 ц живой массы рекомендуют 30 м<sup>3</sup>/ч, при чем это не конкретное значение, так как холодный период может быть - 11°С; - 20°С; - 40°С и т.д.. Такая же ситуация складывается и при проектировании свинарника на теплый период года. Так, используя приведенные данные затрат воздуха

на 1 ц живой массы взрослой свиньи (старше 6 месяцев), в холодный и переходной периоды года, можно переохладить помещение, а соответственно и животных [4,5,6].

Исследование изменения температуры и влажности в животноводческом помещении выполнялась по термометрам и датчикам влажности, мощность менялась с помощью ступенчатого включения секций нагревателя.

Необходимо отметить, что при выборе верхнего и нижнего уровней факторов необходимо учитывать ограничение, связанные со свойствами объекта исследования [7]:

- по зоотехническим требованиям, значения влажности в помещении содержания свиней не должны выходить за пределы 70 - 75%;
- температура на выходе из ЭКУ не может быть выше за 50°С ;
- значение влажности на выходе из ЭКУ не должно выходить за пределы 40 - 90%.

По полученным результатам получили зависимости температуры в помещении свинарника от влажности в помещении для содержания свиней и температуры и влажности на выходе из электрокалориферной установки (ЭКУ), (рис. 1).

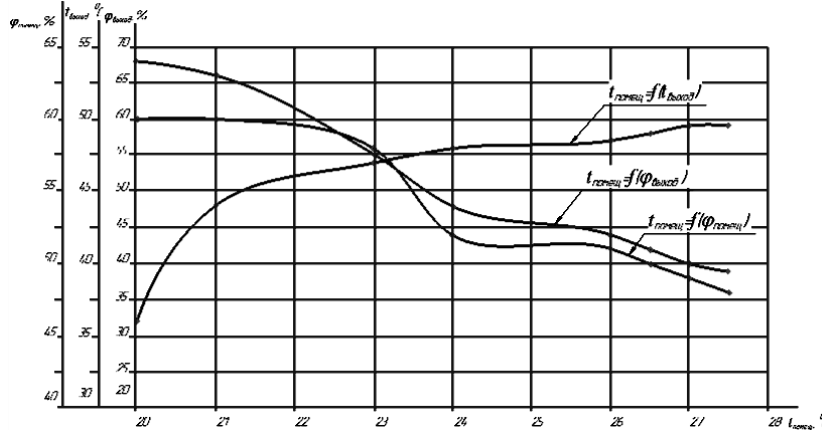


Рис. 1. Зависимость температуры в помещении свинарника от влажности и температуры в помещении и влажности на выходе из ЭКУ при работе всех трех секции нагревателей

Fig. 1. The dependence of the temperature in the premises of the pigsty on humidity and temperature in the room and humidity at the outlet of the ESC during the operation of all three sections of the heaters

Полученные результаты полного факторного эксперимента являются диагональной матрицей, а значит коэффициенты регрессии не корреляционные между собой, ведь значимость для каждого коэффициента отдельно проверяли по критерию Ст'юдента, при этом исключение из уравнения регрессии не значимого коэффициента не влияло на другие коэффициенты. Величина коэффициента уравнения регрессии характеризуют вклад каждого фактора в величину y. Диагональные элементы ковариационной матрицы раны между собой, поэтому все коэффициенты уравнения определялись с одинаковой точностью [7].

При выполнении расчетов учитывались следующие факторы; X<sub>1</sub> – влажность воздуха в помещении свинарника, %; X<sub>2</sub> – температура на выходе из ЭКУ, °С; X<sub>3</sub> – влажность воздуха на выходе из ЭКУ, %.

После проведения соответствующих расчетов уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 20,87 + x_1 + x_2 + 2,875x_3 + x_1x_2 +$$

$$x_1x_3 + x_2x_3 + x_1x_2x_3$$

Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии, использовали критерий Фишера [8].

При остаточной дисперсии  $S_{ост}^2 = 1,01$ , критерий Фишера составил  $F_m = 0,033$ , были рассчитаны степени свободы  $q_1 = 7$ ,  $q_2 = 16$ .

По полученным степеням свободы по [8] определяем теоретическое значение критерия Фишера -  $F_m = 3,47$ .

$F_m = 3,47 > F_p = 0,033$  - условие выполняется, то есть полученная математическая модель с доверительной достоверностью 95% достаточно описывает исследуемый процесс.

### ВЫВОДЫ

Вследствие этого можно сделать вывод, что при существующем технологическом оборудовании, по созданию микроклимата в свиноматке, можно уменьшить эксплуатационные затраты и увеличить производительность животных за счет использования парного числа электрокалориферных установок и предусмотреть помещение для смешивания внешнего и внутреннего воздуха.

При этом затраты электроэнергии уменьшатся на 2,8 %, удельные затраты электроэнергии уменьшатся на 18,6 %, валовой прирост свиней возрастет на 19%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Требования предъявляемые к микроклимату помещений сельскохозяйственных комплексов и к системам отопления и вентиляции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: //www. klimat – in. ru. - Название с экрана.
2. Баланин В. И. Зоотехнический контроль микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях. – 2 – е изд., перераб и доп. / В. И. Баланин. – Л.: Агрпромиздат, 1988. – 144 с.
3. Ходанович Б. В. Проектирование и строительство животноводческих объектов / Б. В. Ходанович. – М.: Агрпромиздат, 1990. – 255 с.
4. Алтухов Н. Зависимость микроклимата в свиноматках от вида ограждающих конструкций / Н.

Алтухов, В. Шаронин, Е. Протченко, О. Мистюкова // Свиноводство. – 2002. - № 6. – С 28 – 29.

5. Шкеле А. Э. Энергоэкономическая оценка микроклимата свиноматки / А. Э. Шкеле // Дослідження науки і техніки АПК. – 1991. - № 2. – С 34 – 35.

6. Шведов В. К вопросу о создании микроклимата в свиноматках / В. Шведов // Свиноводство. 1992. - № 5 – 6. – С 12 – 14.

7. Гайдарин А. Н. Применение полнофакторного эксперимента при проведении исследований: методические указания / А. Н. Гайдарин, С. А. Ефремова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 16 с.

8. Крутников В. И. Основы научных исследований: Учебник для технических ВУЗов / В. И. Крутников, И. М. Грушко, В. В. Попов. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.

### REFERENCES

1. The requirements for the microclimate of the premises of agricultural complexes and for heating and ventilation systems. [Electronic resource]. - Access mode: // www. klimat - in. ru. - The name from the screen.
2. Balanin V. I. Zootechnical control of the microclimate in livestock and poultry facilities. - 2nd ed., Revised and add. / V.I. Balanin. - L. : Agropromizdat, 1988. -- 144 p.
3. Khodanovich B.V. Design and construction of livestock facilities / B.V. Khodanovich. - M. : Agropromizdat, 1990. -- 255 p.
4. Altukhov N. The dependence of the microclimate in pigsties on the type of enclosing structures / N. Altukhov, V. Sharonin, E. Protchenko, O. Mistyukova // Pig production. - 2002. - No. 6. - C 28 - 29.
5. Shkele A. E. Energy-economic assessment of the microclimate of the pigsty / A... Shkele // Proceedings of science and technology of the agro-industrial complex. - 1991. - No. 2. - C 34 - 35.
6. Shvedov V. On the issue of creating a microclimate in pigsties / V. Shvedov // Pig production. 1992. - No. 5 - 6. - C 12 - 14.
7. Gaidarin A. N. The use of a full-factor experiment during research: guidelines / A. N. Gaidarin, S. A. Efremova. - Volgograd: VolgSTU, 2008. - 16 p.
8. Krutnikov V. I. Fundamentals of scientific research: a Textbook for technical universities / V. I. Krutnikov, I. M. Grushko, V. V. Popov. - M.: Higher School, 1989. - 400 p.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF DYNAMICS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY REGIMES IN THE PIG ON THE TECHNOLOGICAL ANIMAL CONTENTS

FEDIUSHKO Y.M.

**Summary:** This article describes the results of a study of technological equipment for creating a microclimate in a pigsty.

**Key words:** microclimate, mathematical model, devices, dependencies.



УДК 535.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АМОРФНЫМИ ФОТОПРЕОБРАЗУЮЩИМИ СТРУКТУРАМИ

Быков М.А., Бекиров Э.А., Мазинов А.С., Шевченко А.И.

Крымский Федеральный Университет им. В.И.Вернадского, (структурное подразделение Физико-Технический Институт), г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация. e-mail: bekirov.e.a@cfuv.ru

**Аннотация** В данной статье предложена модель описания взаимодействия электромагнитной волны светового излучения с неупорядоченными (аморфными) полупроводниковыми плёнками. В рамках данной модели коэффициент поглощения аморфных структур складывается из двух компонентов. Первый из них описывает влияние псевдокристаллической структуры, второй – дефектных состояний. Представлены математические зависимости для каждого из компонентов.

Для плёночных структур размерами рабочих слоёв порядка 100 нм требуется учитывать влияние переходного слоя кристаллический – аморфный материал. В зависимости от разности шагов атомных решёток и степени шероховатости исходных поверхностей подложек переходная область может колебаться в пределах от 5 до 100 нм.

**Ключевые слова:** энергетический уровень, электромагнитная волна, коэффициент поглощения, псевдокристалл, аморфный материал, фотоэлементы, дефектные центры

**ВВЕДЕНИЕ**

В современной оптоэлектронике и, в частности, фотовольтаике, нередко применяются приборы на основе аморфных материалов, функция которых состоит в приёме и преобразовании оптического излучения. В целом получение аморфных полупроводниковых структур с оптимальными оптическими характеристиками представляет собой сложную задачу [1]. В частности, необходимо решить некоторые проблемы, связанные с пониманием протекающих процессов в фотопреобразующей системе. Для полного понимания процесса взаимодействия оптического излучения с неупорядоченными аморфными структурами требуется построение теоретической модели на основе микро- и макропараметров и её согласование с характеристиками, полученными экспериментальным путём [2]. Модель, предлагаемая в настоящей статье, базируется на стехиометрических и структурных параметрах.

**1. Компоненты поглощения**

При взаимодействии оптической волны с полупроводниковыми структурами, как кристаллическими, так и аморфными, происходит внутренний фотоэффект. При этом образуется избыточный электрон, для которого можно записать волновую функцию [3]:

$$\psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = \exp\left[-\frac{i}{\hbar} \varepsilon_n(\vec{k})t\right] u_{n\vec{k}}(\vec{r}) \exp(i\vec{k}\vec{r}). \quad (1)$$

В данной формуле  $\varepsilon_n(\vec{k})$  – энергия электрона,  $u_{n\vec{k}}(\vec{r})$  – функция с периодом решётки,  $n$  – номер

зоны,  $\vec{k}$  – приведённый волновой вектор электрона,  $t$  – время,  $\hbar$  – постоянная Планка (Дирака).

В таком случае матричный элемент энергии возмущения при поглощении фотона для перехода от  $k_1$  к  $k_2$  может быть выражен:

$$\langle n_2, \vec{k}_2 | \mathbf{H}' | n_1, \vec{k}_1 \rangle = \int d^3r \psi_{n_2\vec{k}_2}^* \mathbf{H}' \psi_{n_1\vec{k}_1},$$

$\mathbf{H}'$  – гамильтониан взаимодействия фотонов и рассматриваемого поглощающего слоя.

В аморфной матрице энергетический периодический потенциал  $u_{nk}(\mathbf{r})$  в (1) можно заменить на комплекс независимых функций [4]. Данные функции отвечают за псевдокристаллическую периодичность (псевдопериодичность) каждого из дефектов неупорядоченной структуры. При этом для каждой из симметрий следует ввести свой гамильтониан взаимодействия [5]:

$$\hat{\mathbf{H}}' = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta_i\right) + \sum_a \left(-\frac{\hbar^2}{2M} \Delta_a\right) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \frac{e^2}{r_{ij}} + V_0(R_1, R_2, \dots, R_N) + U(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N).$$

Как результат, энергетический спектр собственных функций для электронов проводимости в аморфных структурах выражается в виде системы уравнений [6]:

$$\begin{cases} E_{d_1} = (E_a + E_{a-1})/2 + C_{d_1} + \xi_1 \\ \dots \\ E_{d_j} = (E_a + E_{a-1})/2 + C_{d_j} + \xi_j \\ \dots \\ E_{d_m} = (E_a + E_{a-1})/2 + C_{d_m} + \xi_m \end{cases} .$$

Здесь  $E_{dj}$  – дискретный энергетический уровень под номером  $j$  в аморфной составляющей материала,  $E_a$  – энергия  $a$ -той энергетической зоны в изолированном атоме,  $C_{dj}$  – изменение положения  $j$ -го энергетического уровня под влиянием структуры материала.

Указанная система характеризует энергетическую структуру аморфного материала с определённым числом неоднородностей, каждая из которых взаимодействует с электромагнитной волной. Первое уравнение описывает зону проводимости и, соответственно, представляет прямые и не прямые оптические переходы. Следующие равенства показывают количественную и качественную оценку встроенных дефектных подсимметрий. Последовательный сдвиг по  $E_{dj} = (E_a - E_{a-1})/2 + C_{dj} + \xi_j$  в  $E_g$  для  $j$ -типа дефекта даёт набор локализованных центров. Зонная диаграмма для подобной структуры может иметь вид, представленный на рис. 1.

В соответствии с предлагаемой моделью коэффициент поглощения включает в себя два компонента. Первый из них описывает переходы в псевдокристаллической части структуры, а второй – дефектной.

Для количественного описания каждого из компонентов необходимо понять процессы, происходящие при образовании твердотельной структуры. Особенно важны начальные условия формирования атомной решётки полупроводникового материала.

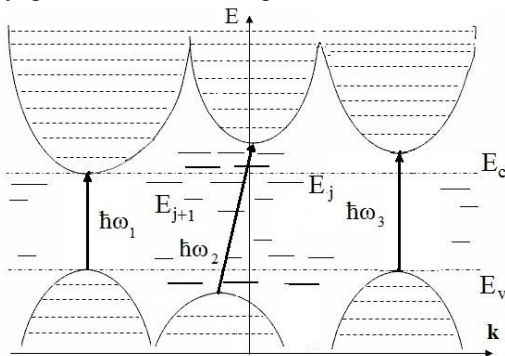


Рис. 1. Зонная диаграмма неупорядоченной структуры.

Fig. 1. Zone diagram of disordered structure.

Как известно, свойства аморфных материалов зависят от методов их получения. В частности, при напылении формирование структуры от одного слоя к другому не является однородным до некоторой толщины. Степень однородности образуемой аморфной плёнки зависит от влияния многих факторов: технологии, метода и приёма напыления, режима работы установки, а также структуры и шероховатости поверхности подложки [5].

Одним из видов неоднородностей, формируемых при напылении тонких плёнок, является меняющаяся плотность атомов в каждом из слоёв. Данный эффект заключается в различном расстоянии между атомами в разных слоях до определённой толщины.

В связи с различным расстоянием между атомами наблюдается неодинаковая ширина запрещённой зоны [7]. Исходя из [8], зависимость энергетического уровня от волнового вектора  $k$  вблизи абсолютных минимумов зоны проводимости представляется в виде (рис. 1):

$$E(\vec{k}) = E(k_0) + \frac{\hbar^2 [(k_x - k_{0x})^2 + (k_y - k_{0y})^2]}{2m_1} + \frac{\hbar^2 (k_z - k_{0z})^2}{2m_2}$$

где  $E(k_0)$  – энергия электрона при  $k_0$ ,  $m$  – его масса.

Трудоёмкость описания таких плёночных структур вызвана также тем, что в процессе формирования периодичность выстраивания атомов слоёв, лежащих выше, зависит от строения нижних слоёв. Однако растущие верхние слои также оказывают влияние на степень периодичности в нижних слоях, что приводит к изменению в них ширины запрещённой зоны. Для упрощения последующих вычислений можно ввести некоторую среднюю ширину запрещённой зоны. При данном упрощении генерация носителей зарядов представляется среднестатистической генерацией по всем слоям.

## 2. Поглощение псевдокристаллической частью

Для описанного ранее представления псевдопериодического расположения дефектов в атомной решётке можно использовать широко известную теорию поглощения оптического излучения кристаллическими полупроводниками. При этом для разрешённых переходов коэффициент поглощения имеет вид [3]:

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \frac{e^2}{m^2 c n \omega} \int d^3 k |\vec{e} \vec{p}_{cv}|^2 \delta[\mathcal{E}_c(\vec{k}) - \mathcal{E}_v(\vec{k}) - \hbar \omega] \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света,  $n$  – коэффициент преломления структуры,  $\vec{e}$  – единичный вектор,  $\vec{p}_{cv}$  – матрица перехода для импульса,  $\mathcal{E}_c$  – энергия зоны проводимости,  $\mathcal{E}_v$  – энергия валентной зоны,  $\hbar \omega$  – энергия перехода.

Тем не менее, требуется обозначить условия, при которых эта теория является рабочей. При рассматриваемой симметрии в структуре материала должна обеспечиваться эллипсоидность для поверхностей постоянной энергии носителей заряда каждого типа вблизи своих экстремумов. В таком случае энергии электронов и дырок в зоне проводимости и валентной зоне определяются следующими соотношениями:

$$\mathcal{E}_c(\vec{k}) = \mathcal{E}_c(\vec{k}_0) + \frac{\hbar^2}{2} \left[ \frac{(k_1 - k_{01})^2}{m_{c1}} + \frac{(k_2 - k_{02})^2}{m_{c2}} + \frac{(k_3 - k_{03})^2}{m_{c3}} \right], \quad (3a)$$

$$\varepsilon_v(\vec{k}) = \varepsilon_v(\vec{k}_0) + \frac{\hbar^2}{2} \left[ \frac{(k_1 - k_{01})^2}{m_{v1}} + \frac{(k_2 - k_{02})^2}{m_{v2}} + \frac{(k_3 - k_{03})^2}{m_{v3}} \right], \quad (3b)$$

где для главных осей эллипсоидов 1, 2, 3 представлены эффективные массы электронов  $m_{ci}$  и  $m_{vi}$ .

Эффективные массы электронов и дырок можно объединить в приведённый тензор эффективных масс с компонентами  $\mu_i = m_{ci} \cdot m_{vi} / (m_{ci} + m_{vi})$ , а аргумент функции  $\delta$  в интеграле (2) – записать в виде [3]:

$$\varepsilon_c(\vec{k}) - \varepsilon_v(\vec{k}) - \hbar\omega = \frac{\hbar^2}{2} \times \left[ \frac{(k_1 - k_{01})^2}{\mu_1} + \frac{(k_2 - k_{02})^2}{\mu_2} + \frac{(k_3 - k_{03})^2}{\mu_3} \right] - (\hbar\omega - \varepsilon_0) \quad (4)$$

При разрешённых переходах:

$$\vec{e}\vec{p}_{cv}(\vec{k}) = \vec{e}\vec{p}_{cv}(\vec{k}_0). \quad (5)$$

Проинтегрировав (2) с условиями (3a, b), (4) и (5), можно получить сумму по всем элементам матрицы перехода импульса. После серии замен переменных и интегрирования получаем следующее выражение [4]:

$$\alpha'_{per} = \frac{4\sqrt{2}e^2}{m^2cn\omega} \sum_{\vec{k}_0} |\vec{e}\vec{p}_{cv}(\vec{k}_0)|^2 \frac{\sqrt{\mu_1\mu_2\mu_3}}{\hbar^3} (\hbar\omega - \varepsilon_0)^{1/2}$$

где  $\varepsilon_0$  – энергия уровня перехода.

Сначала применим математическое описание для разрешённых переходов [9, 10]. С учётом того, что  $\alpha_{per}$  зависит от вещественной части удельной проводимости  $\sigma$ , изотропной вдоль направления вектора  $\vec{k}$  в области одного структурного элемента, после разбиения кристаллической и аморфной матриц вероятность поглощения принимает вид:

$$\sum_{\vec{k}_0} |\vec{e}\vec{p}_{cv}(\vec{k}_0)|^2 = 4 \frac{p_{cux}^2 + p_{cuy}^2 + p_{cuz}^2}{3}.$$

Для стандартной зоны и однородной области в точке  $k_0 = 0$  коэффициент поглощения определяется следующей зависимостью:

$$\alpha'_{per} = \frac{2e^2}{m^2cn\omega} |\vec{e}\vec{p}_{cv}(0)|^2 \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\hbar\omega - \varepsilon_0)^{1/2}$$

в которой  $\mu = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ , при условии однородности перехода по направлениям.

В единичном объёме для  $j$ -той области псевдокристалла матрица перехода для импульса связана с матрицей перехода по единичному объёму  $\vec{p}_{cvj}(\vec{k}_0)$  интегральной зависимостью:

$$\int_V |\vec{e}\vec{p}_{cv}(0)|^2 dr = |\vec{e}\vec{p}_{cvj}(0)|^2.$$

Для учёта поглощения в хвостах, образованных кристаллической частью, необходимо найти сумму рекомбинаций от разных неоднородностей.

Число поглощённых в  $1 \text{ см}^3$  за 1 сек фотонов соответствует числу переходов  $W_{vc}$ . Если в таком

случае через эту область проходит  $N_v$  фотонов, то можно записать следующие соотношения:

$$\alpha_{per} = \frac{W_{vc}}{N_v} = \frac{W_{vc1}}{N_v} + \frac{W_{vc2}}{N_v} + \dots + \frac{W_{vcj}}{N_v},$$

$$\alpha(\omega)_{per} = \alpha_1(\omega) + \alpha_2(\omega) + \dots + \alpha_j(\omega),$$

здесь  $\alpha_j$  – коэффициент поглощения от центра  $j$ -типа.

Для нахождения коэффициента поглощения всеми центрами необходимо просуммировать зависимости для каждого из них:

$$\alpha_{per} = \frac{2e^2}{m^2cn\omega} |\vec{e}\vec{p}_{cv1}(0)|^2 \left( \frac{2\mu_1}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\hbar\omega - \varepsilon_{01})^{1/2} + \frac{2e^2}{m^2cn\omega} |\vec{e}\vec{p}_{cv2}(0)|^2 \left( \frac{2\mu_2}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\hbar\omega - \varepsilon_{02})^{1/2} + \dots \dots + \frac{2e^2}{m^2cn\omega} |\vec{e}\vec{p}_{cvR}(0)|^2 \left( \frac{2\mu_j}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\hbar\omega - \varepsilon_{0R})^{1/2}$$

Данное выражение можно записать компактно:

$$\alpha_{per} = \frac{2e^2}{m^2cn\omega} \sum_{j=1}^R |\vec{e}\vec{p}_{cvj}(0)|^2 \left( \frac{2\mu_j}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\hbar\omega - \varepsilon_{0j})^{1/2}$$

Модель периодического поля в структуре представляет возможность принять его однородным для разных рекомбинационных центров в псевдокристаллической решётке:

$$\sum_{j=1}^R \left( \frac{2\mu_j}{\hbar^2} \right)^{3/2} f = \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sum_{j=1}^R f.$$

$\mu$  представляет собой среднее значение, которое можно получить экспериментальным путём. В таком случае коэффициент поглощения может быть представлен в виде:

$$\alpha_{per} = \frac{2e^2}{m^2cn\omega} \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sum_{j=1}^R |\vec{e}\vec{p}_{cvj}(0)|^2 (\hbar\omega - \varepsilon_{0j})^{1/2}$$

Вид валентной зоны и зоны проводимости зависит и от наличия различных неоднородностей, поэтому существуют зависимости  $p_{cvj} \sim b_j$ , а  $\varepsilon_{0j} \sim \xi_j$ . Кроме того, с учётом указанного ранее следует брать во внимание существование зависимости ширины запрещённой зоны от толщины аморфной плёнки. Эта зависимость особенно проявляется от нулевой до некоторой толщины  $L$ , в которую поместится  $t$  атомных слоёв. С учётом того, что параметры каждого слоя от слоя к слою меняются незначительно, выполняется утверждение:

$$\varepsilon_{0j(n)} - \varepsilon_{0j(n-1)} \approx \varepsilon_{0j(n+1)} - \varepsilon_{0j(n)=\Delta} \varepsilon_{0j} \rightarrow 0.$$

Так, при наличии  $t$  атомных слоёв материала и  $z$  атомных слоёв в единице объёма, можно записать:

$$\alpha_{per} = \frac{2ze^2}{m^2ctn\omega} \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sum_{n=1}^t \sum_{j=1}^R |\vec{e}\vec{p}_{cvjn}(0)|^2 (\hbar\omega - \varepsilon_{0jn})^{1/2} \quad (6)$$

А для запрещённых переходов для однородной структуры:

$$\alpha_{for} = \frac{2e^2}{3m^2cn\omega} \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{5/2} \left| \frac{\partial}{\partial \mathbf{k}} \overline{\overline{\mathbf{e}p}}_{cv}(0) \right|^2 (\hbar\omega - \varepsilon_0)^{3/2}$$

Применяя модельное представление для разрешённых переходов, для коэффициента поглощения получим следующее выражение:

$$\alpha_{for} = \frac{2e^2}{3m^2cn\omega} \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{5/2} \sum_{j=1}^{R'} \left| \frac{\partial}{\partial \mathbf{k}} \left[ \overline{\overline{\mathbf{e}p}}_{cvj}(0) \right] \right|^2 (\hbar\omega - \varepsilon_{0j})^{3/2}$$

а для нескольких слоёв:

$$\alpha_{for} = \frac{2ze^2}{3m^2cn\omega} \left( \frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{5/2} \sum_{n=1}^t \sum_{j=1}^{R'} \left| \frac{\partial}{\partial \mathbf{k}} \left[ \overline{\overline{\mathbf{e}p}}_{cujn}(0) \right] \right|^2 (\hbar\omega - \varepsilon_{0nj})^{3/2} \quad (7)$$

Для псевдокристаллической составляющей результирующий коэффициент поглощения будет складываться из суммы:

$$\alpha_c = \alpha_{per} + \alpha_{for}$$

### 3. ПОГЛОЩЕНИЕ ДЕФЕКТНЫМИ УРОВНЯМИ

Переходы, связанные с дефектной составляющей и дающие определённый вклад в процесс рекомбинации могут иметь вид, схематично представленный на рис. 2.

При изменении ширины запрещённой зоны в зависимости от формирования плёнки некоторые типы дефектов претерпевают изменения, связанные с внешним энергетическим распределением поля.

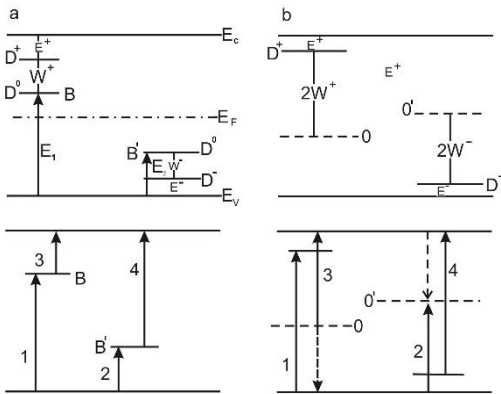


Рис. 2. Дефекты D<sup>0</sup>, D<sup>+</sup> и D<sup>-</sup> и оптические переходы в запрещённой зоне полупроводникового материала (слева – тепловые, справа – оптические)

Fig. 2. Defects D<sup>0</sup>, D<sup>+</sup> and D<sup>-</sup> and optical transitions in the band gap of the semiconductor material (thermal left, optical right)

Для дефектного центра коэффициент поглощения может выражаться следующей формулой [11, 12]:

$$\alpha_a(\lambda) = \frac{4\pi e^2 \Delta N_{nm} \omega^2 \gamma}{cm \left[ (\omega_{nm}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2 \right]}$$

в которой  $\Delta N_{nm}$  – разность населённости уровней n и m,  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий затухание. Первая из двух вышеуказанных величин определяется равенством:

$$\Delta N_{nm} = N_m - (g_m / g_n) N_n,$$

где  $g_m$  и  $g_n$  – статистические веса населённости уровней.

Если распределить дефектные центры, то для j-го центра:

$$\alpha_{aj}(\lambda) = \frac{4\pi e^2 \Delta N_j \omega^2 \gamma_j}{cm \left[ (\omega_j^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_j^2 \right]}, \quad (8)$$

при этом  $\omega_j = \omega_{nm}$  и  $\Delta N_j = \Delta N_{nm}$ .

Естественным образом, общее поглощение аморфной составляющей представляет собой сумму коэффициентов поглощения для каждого из дефектов:

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{j=1}^K \alpha_{aj}(\lambda), \quad (9)$$

где K – количество центров поглощения в аморфной составляющей.

При объединении (8) и (9), получим [12]:

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{j=1}^K \frac{4\pi e^2 \Delta N_j \omega^2 \gamma_j}{cm \left[ (\omega_j^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_j^2 \right]}$$

$\Delta N_j$  может быть описано следующим выражением:

$$\Delta N_j = s_j b_j$$

в котором  $s_j$  – функция, связывающая количество данной моды колебания  $b_j$  с разностью населённости уровней n и m. Подставляя вышеприведённое выражение в формулу коэффициента поглощения, получим:

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{j=1}^K \frac{4\pi e^2 s_j b_j \omega^2 \gamma_j}{cm \left[ (\omega_{nmj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_j^2 \right]}$$

В данную формулу можно ввести также энергетическую величину  $\xi_j$  [11]:

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{j=1}^K \frac{4\pi e^2 s_j b_j \omega^2 \gamma_j}{cm \left[ \left( \left( \xi_j + \frac{E_g}{2} \right)_j^2 - \omega^2 \right)^2 + \omega^2 \gamma_j^2 \right]}$$

С учётом энергетического смещения некоторых дефектных центров  $\Delta \xi_{nj}$  под действием окружающего их потенциала для t слоёв имеем:

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{n=1}^t \sum_{j=1}^K \frac{4\pi e^2 \frac{s_{jn} b_j}{z} \omega^2 \gamma_{jn}}{cm_0 \left[ \left( \left( \xi_j + \frac{E_{gn}}{2} + \Delta \xi_{nj} \right)_{jn}^2 - \omega^2 \right)^2 + \omega^2 \gamma_{jn}^2 \right]} \quad (10)$$

## ВЫВОДЫ

Представленная физико-математическая модель показывает, что коэффициент поглощения аморфных полупроводниковых материалов, применяемых в качестве активных слоёв оптоэлектронных приборов, может быть представлен в виде суммы коэффициентов поглощения псевдокристаллической и аморфной составляющих.

Для плёночных структур, размеры рабочих слоёв которых составляют порядка 100 нм, следует учитывать влияние переходного слоя кристаллический – аморфный материал. В зависимости от разности шагов атомных решёток и степени шероховатости исходной поверхности переходная область может составлять от 5 до 100 нм. В таком случае возникает градиент псевдозапрещённой зоны. Поэтому при данных условиях требуется учитывать изменения ширины запрещённой зоны  $E_{gn}$ . При этом для данной зоны справедлив предел:

$$\lim_{x \rightarrow L} \frac{dE_{gn}}{dx} \rightarrow 0$$

где  $L$  - характеристическая длина. Запрещённая зона  $E_{gn}$  становится равной запрещённой зоне  $E_g = \text{const}$  псевдокристаллической части плёнки.

Как результат, общий коэффициент поглощения сложной аморфной структуры полупроводникового прибора может быть записан суммированием всех составляющих (6), (7) и (10).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gibson J.M. Fluctuation microscopy analysis of amorphous silicon models / J.M. Gibson, M.M.J. Treacy // *Ultramicroscopy*. – 2017. – V. 176. – P. 74–79.
- [2] Band gap profiles of intrinsic amorphous silicon germanium films and their application to amorphous silicon germanium heterojunction solar cells / T. Krajangsang, S. Inthisang, A. Dousse [et al.] // *Optical Materials*. – 2016. – V. 51. – P. 245–249.
- [3] Ансельм И.А. Введение в теорию полупроводников. – М., Наука. – 1978.
- [4] Мазинов А.С. Описание взаимодействия квантового излучения с аморфными плёночными структурами / А.С. Мазинов, В.А. Бахов, М.А. Быков // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 447–451.
- [5] Мазинов А.С., Бахов В.А. Наздеркин Е.А. Локализованные состояния наноразмерных полупроводниковых структур // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 14 – 18 сент. 2009 г.). – Севастополь: Вебер. – 2009. – Т. 2 – С. 623–624.
- [6] Mazinov A. The quantization of the absorption spectrum for amorphous semiconductor films / A. Mazinov, A. Shevchenko // *Proceedings of the International Conference “Nanomaterials: Applications*

and Properties” . – Sumy – Alushta. – 2013. – V. 2, № 1, 01NTF13-1, 2 p.

[7] Bedghiou D. Novel high/ultrahigh pressure structures of TiO<sub>2</sub> with low band gaps / D. Bedghiou, F. Hamza Reguig, A. Boumaza // *Computational Materials Science*. – 2019. – V. 166. – P. 303–310.

[8] Рыбкин В.В., Титов В.А., Смирнов С.А. Физика твёрдого тела. – Иваново. – 2001.

[9] Mazinov A.S. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors / A.S. Mazinov, A.I. Shevchenko, and E.I. Terukov // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. – 2015. – V. 9, № 6. – P. 778–782.

[10] Mazinov A. The offset of the quantum interband transitions in non-crystalline semiconductors / A. Mazinov, A. Shevchenko // *Optical and Quantum Electronics*. – 2015. – V. 47, № 7. – P. 1659–1669.

[11] Королёв Ф. А., Теоретическая оптика. – М. – 1966.

[12] Mazinov A. Quantum interactions of optical radiation with the defect centres in the tails of the forbidden band of amorphous materials / A. Mazinov, A. Shevchenko, V. Bahov // *Optica Applicata*. – 2014. – V. 44, № 2. – P. 327–335.

## REFERENCES

- [1] Gibson J.M. Fluctuation microscopy analysis of amorphous silicon models / J.M. Gibson, M.M.J. Treacy // *Ultramicroscopy*. - 2017. - V. 176. - P. 74–79.
- [2] Band gap profiles of intrinsic amorphous silicon germanium films and their application to amorphous silicon germanium heterojunction solar cells / T. Krajangsang, S. Inthisang, A. Dousse [et al.] // *Optical Materials*. - 2016. - V. 51. - P. 245–249.
- [3] Anselm I.A. Introduction to the theory of semiconductors. - M., Science. - 1978.
- [4] Mazinov A.S. Description of the interaction of quantum radiation with amorphous film structures / A.S. Mazinov, V.A. Bakhov, M.A. Bykov // *Applied Radio Electronics*. - 2013. - T. 12, No. 3. - S. 447–451.
- [5] Mazinov A.S., Bakhov V.A. Nazderkin E.A. Localized states of nanoscale semiconductor structures // 19th Crimean International Conference “Microwave and Telecommunication Technologies” (KryMiKo'2009): materials conf. in 2 volumes (Sevastopol, September 14 - 18, 2009). - Sevastopol: Weber. - 2009. – V. 2 - C. 623–624.
- [6] Mazinov A., The quantization of the absorption spectrum for amorphous semiconductor films / A. Mazinov, A. Shevchenko // *Proceedings of the International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties”*. - Sumy - Alushta. - 2013. - V. 2, No. 1, 01NTF13-1, 2 p.
- [7] Bedghiou D. Novel high / ultrahigh pressure structures of TiO<sub>2</sub> with low band gaps / D. Bedghiou, F. Hamza Reguig, A. Boumaza // *Computational Materials Science*. - 2019. -- V. 166. - P. 303–310.
- [8] Rybkin V.V., Titov V.A., Smirnov S.A. *Solid State Physics*. - Ivanovo. - 2001.
- [9] Mazinov A.S. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors /

A.S. Mazinov, A.I. Shevchenko, and E.I. Terukov // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. - 2015. - V. 9, No. 6. - P. 778–782.

[10] Mazinov, A. The offset of the quantum interband transitions in non-crystalline semiconductors / A. Mazinov, A. Shevchenko // Optical and Quantum Electronics. - 2015. - V. 47, No. 7. - P. 1659–1669.

[11] Korolev F. A., Theoretical optics. - M.– 1966.

[12] Mazinov, A. Quantum interactions of optical radiation with the defect centers in the tails of the forbidden band of amorphous materials / A. Mazinov, A. Shevchenko, V. Bahov // Optica Applicata. - 2014. - V. 44, No. 2. - P. 327–335.

## RESEARCH OF THE INTERACTION OF QUANTUM RADIATION WITH AMORPHIC PHOTO TRANSFORMING STRUCTURES

Bykov M.A., Bekirov E.A., Shevchenko A.I., Mazinov A.S.

**Summary** In this paper proposed model, describing the quantum interaction of photons with amorphous thin-films semiconductors structures. It is set that the coefficient of absorption of active layers of films semiconductor devices appears, as a sum of pseudocrystalline and amorphous component.

It is shown that for films structures by the sizes of working layers about 100 nm, it is necessary to take into account influence of transitional layer a crystal – amorphous silicon. Depending on the difference of steps of atomic lattices and degree of roughness of initial surfaces of substrates, a transitional area can make from 5 to 100 nm.

**Key words:** coefficient of absorption, films semiconductors structures, amorphous silicon.

## Раздел 4. Экологическая безопасность

УДК 624 +004

### ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МАССИВОВ ЗАРУБЕЖНЫХ И РОССИЙСКИХ БАЗ ДАННЫХ

Рыкова В.В.

Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук, 630200, Новосибирск, ул. Восход,15, Rykova@gpntbsib.ru

**Аннотация.** Автор анализирует информационные массива по проблемам геотехнического мониторинга в России и мире с использованием международной базы данных Web of Science компании Thomson Reuters, Российского индекса научного цитирования (e-Library) и региональной базы данных собственной генерации Государственной публичной научно-технической библиотекой Сибирского отделения Российской академии наук «Научная Сибирика».

Информационные массивы отобраны из выше означенных баз данных, которые являются базами библиографического типа, свободный доступ к полным текстам в них возможен только для части документов, большая часть информации доступна по лицензии.

Библиометрический анализ информационных массивов проведен с использованием аналитических сервисов баз данных, результаты анализа наглядно представлены в виде графиков и таблиц.

Прослежены тренды развития исследований по проблеме в России и мире; продемонстрирован вклад разных стран и научных организаций в развитие данного направления исследования; составлен перечень самых продуктивных периодических и сериальных изданий, включающих материалы по геотехническому мониторингу. Проведен анализ публикационной активности авторов, показаны наиболее цитируемые статьи англоязычного и русскоязычного корпуса документов по означенной теме, а также российские диссертационные исследования последних лет.

Сделаны выводы о перспективности и актуальности данной области научных исследований, свидетельством чего является активный рост числа публикаций по теме как в России, так и в ведущих экономически развитых государствах мира.

**Ключевые слова:** геотехнический мониторинг, информационное сопровождение, БД Web of Sciences, Российского индекса научного цитирования e-Library, база данных «Научная Сибирика».

#### ВВЕДЕНИЕ

Геотехнический мониторинг (геомониторинг) — система слежения за параметрами геологической среды в основании зданий или сооружений, которая обеспечивает безопасное и эффективное осуществление строительно-технологических процессов, ввод и последующую эксплуатацию объектов строительства [1]. Его актуальность обусловлена большим скоплением инженерных коммуникаций, подземных сооружений, постоянно изменяющейся геологической средой и внедрением технологий производства новых типов фундаментов и укрепления оснований. Задачами геомониторинга как комплекса наблюдений за состоянием техногенных, грунтовых и природных условий, возникающий вокруг исследуемого объекта, являются:

- определение состояния геосреды в конкретный момент времени;

- прогноз возможных изменений;
- разработка мер по обеспечению безопасности зданий и сооружений.

Вопросам обеспечения безопасности жизнедеятельности уделяется пристальное внимание политиков, специалистов, ученых в последнее десятилетие

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мировые тренды научных исследований по вышеозначенной проблематике прослежены с использованием базы данных (БД) Web of Science (WoS) компании Thomson Reuters, Российского индекса научного цитирования (e-Library), региональной БД «Научная Сибирика», генерированной Государственной публичной научно-технической библиотекой Сибирского отделения Российской академии наук (ГПНТБ СО

РАН). Исходные данные для анализа были получены из путем формулирования поискового запроса по теме. Анализ корпуса документов в БД проводился с использованием их аналитических сервисов и библиометрических методов анализа потоков документов, взятыми на вооружение крупными информационными центрами [2].

### АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОГО МАССИВА БД WEB OF SCIENCE ПО ПРОБЛЕМАМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В поисковой платформе WoS найдено свыше 2000 записей по геотехническому мониторингу на конец февраля 2019 г., из которых более 300 работ представлены в открытом доступе (Open Access), полные тексты остальных документов можно получить по лицензионному соглашению.

Аналитические сервисы WoS позволяют получить количественные данные по отдельным параметрам выборки.

В динамике публикаций (Рис. 1) прослеживается устойчивый прирост массива информации с конца прошлого столетия, отмечается интенсификация

научных исследований в последнее десятилетие. Во временной структуре массива прослеживаются следующие закономерности:

- до 90-х годов XX века – единичные публикации,
- 90-е – начало 2000-х – рост документального потока с ежегодным приростом публикаций от 20 до 50 документов,
- 2010-2019 гг. – активный рост информационного массива с связи с повышением интереса к проблеме, годовой объем документов составляет 100 и более записей, пиковое количество 199 статей приходится на 2017 г. Поскольку документы 2018 и 2019 годов издания еще не полностью проиндексированы в БД, то эти результаты не окончательные и следует ожидать дальнейшего увеличения потока информации по теме.

Основной язык публикаций – английский (96% - 2013 документов), работы на немецком языке составили 1% (23 документов), статьи на китайском, русском, португальском и других европейских языках немногочисленны и представлены в информационном массиве долями процента.

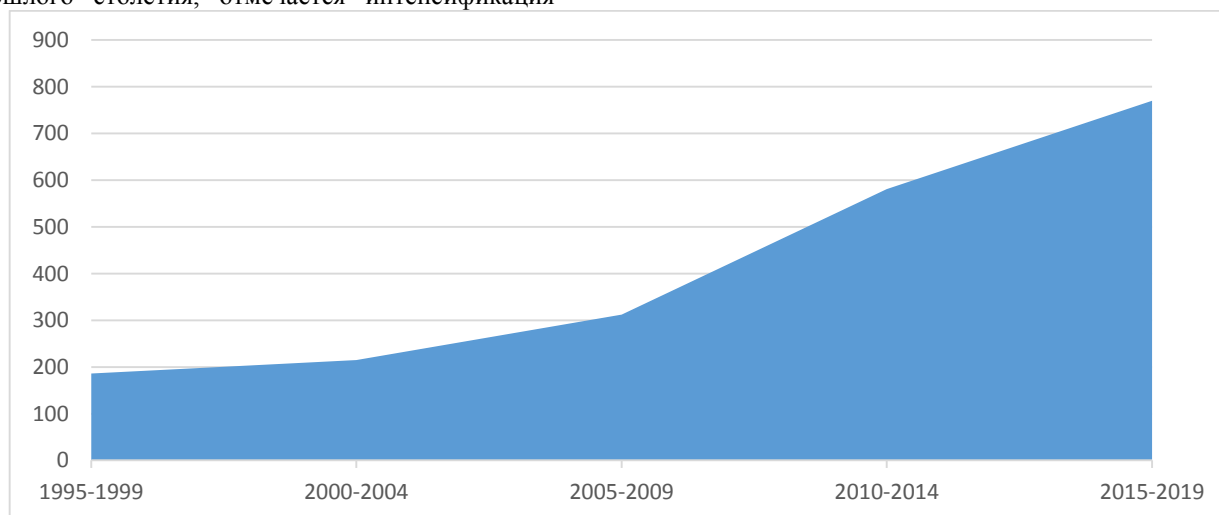


Рис. 1. Временная структура информационного массива по теме в БД WoS

Fig. 1. Temporal structure of the information array on the topic in DB WoS

В таблице 1 показаны Топ-10 стран, активно развивающих исследования по геотехническому мониторингу, с которыми аффилированы авторы публикаций, где наибольшей публикационной активностью по теме отличаются США, Китай, Италия (более 200 работ). Россия делит 10 строчку в

данном рейтинге с Японией, но поскольку российские журналы проводят активную работу по включению в крупнейшие мировые индексы цитирования, очевидно, что доля публикаций российских авторов в них будет расти.

**Таблица 1.** Топ-10 стран-лидеров публикационной активности по теме

**Table 1.** Top 10 countries-leaders of publication activity on the topic

№	Страна	Количество документов
1	США	297
2	Китай	258
3	Италия	215
4	Англия	148
5	Канада	132
6	Германия	131
7	Австралия	99
8	Бразилия	72
9	Чехия	63
10	Россия Япония	62

В таблице 2 приведены сведения о количестве публикаций организаций-лидеров, с которыми аффилированы авторы исследуемого корпуса документов. Среди них первенство удерживают научные учреждения Китая (как академические, так и вузовские), также следует отметить активную работу в данной области науки университетов Италии.

**Таблица 2.** Топ-10 организаций-лидеров по числу публикаций

**Table 2.** Top-10 organizations-leaders in number of publications

№	Название учреждения	Количество документов
1	Chinese Academy of Sciences, China	24
2	Nanjing University, China	21
3	Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland	19
4	University of Cambridge, UK	19
5	Tongji University, China	18
6	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy	17
7	University of Florence, Italy	15
8	University of Bologna, Italy	15
9	University Naples Federico II, Italy	15
10	Rensselaer Polytechnic Institute, USA	15

Среди организаций, финансирующих исследования по проблемам геотехнического мониторинга, лидируют :

National Natural Foundation of China (Национальный фонд изучения природы Китая), Engineering and Physical Sciences Research Council (Научный совет по исследованиям в области инженерии и физики (Великобритания)), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Фонды фундаментальных исследований центральных университетов, Китай), National Science Foundation (Национальный научный фонд, США), National Science Foundation of China (Национальный научный фонд Китая), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (Совет по естественным наукам и инженерным исследованиям Канады). Наиболее продуктивными

с точки зрения публикационной активности научными коллективами являются American Society of Mechanical Engineering (ASME), Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE), Institute of Physics (IoP), International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (SMGE), Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM).

Наибольшей публикационной активностью по теме отличаются следующие авторы: В. Shi и Н. Н. Zhu (Nanjing University, China), Т. Abdoun и V. Bennett (Rensselaer Polytechnic Institute, USA), S. M. Springman (Institute for Geotechnical Engineering, Switzerland), более 10 публикаций которых включены в анализируемый массив БД.

БД WoS создает отчет по цитированию, в котором указано, что 2 105 отобранных документов

процитированы 11 068 раз (без самоцитирования) в 9 532 работах. Таблица 3 представляет самые цитируемые по теме статьи (за минимальный порог

ранжирования принято цитирование более 100 раз) с ключевыми словами авторов и дополнительными ключами от WoS.

**Таблица 3.** Самые цитируемые статьи по теме в БД WoS

**Table 3.** The most cited articles on the topic in DB WoS

Кол-во цитирований	Ключевые слова автора и дополнительные KeyWords Plus WoS	Публикация
316	Bio-mediated; bio-soil; soil improvement; ground improvement; geotechnical engineering; calcite precipitation; microbes; microbial induced calcite precipitation  <i>WoS:</i> stiffness; sand; precipitation; shear	DeJong J. T., et al. Ecological Engineering, 2010, 36(2), 197-210 [3]
288	landslide; satellite remote sensing; synthetic aperture radar; interferometry; permanent scatterers; Liechtenstein  <i>WoS:</i> permanent scatterers technique; surface deformation; displacement-fields; lands earthquake; ground deformation; topographic maps; interferograms; subsidence; areas	Colesanti C., Wasowski J. Engineering Geology, 2006, 88(3/4), 173-199 [4]
269	Rock mass strength; brittle failure; cohesion loss; deviatoric stress; stress path  <i>WoS:</i> bonnet granite; borehole breakouts; in-situ stress; fracture; lac; deformation; criterion; cavities	Martin, C. D. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5), 698-725 [5]
252	European permafrost; climate change; geothermal monitoring; geothermal modelling; geophysics; slope stability; permafrost hazards; permafrost engineering  <i>WoS:</i> western Arctic coast; eastern Swiss alps; Holocene glacier fluctuations; ground-penetrating radar; Northern-hemisphere temperatures; creeping mountain permafrost; layer detachment failures; mean annual temperature; alpine rock glacier	Harris Ch., et al. Earth-Science Reviews, 2009, 92(3/4), 117-171 [6]
149	Chemical properties; environmental engineering; ground improvement; remediation; soil stabilisation  <i>Wos:</i> induced calcite precipitation; carbonate precipitation; hydraulic conductivity; ureolytic bacteria; ground improvement; urease activity; porous-media; soil; sand; microorganisms	DeJong J. T., et al. Geotechnique, 2013, 63(4), 287-301 [7]
122	Instrumentation; Italy; landslides; warning system  <i>Wos:-</i>	Angeli M.G., Pasuto A., Silvano S. Engineering Geology, 2000, 55(3), 133-147 [8]
114	multi temporal interferometry; satellite; landslides; unstable slopes; technical constraints; interpretation issues  <i>wos:</i> permanent scatterers technique; differential sar interferograms; slow-moving landslides; small base-line; x-band; radar interferometry; surface deformation; time-series; generation; accuracy	Wasowski J., Bovenga F. Engineering Geology, 2014, 174, 103-138 [9]

В видовой структуре документов преобладают журнальные статьи и материалы

конференций (соответственно 52% и 49%), остальные виды изданий представлены обзорами

(20 работ), главами из книг (15 документов), 2 репринтами и редакторскими материалами. В таблице 4 названы периодические издания с

максимальной публикационной активностью по теме «геотехнический мониторинг».

**Таблица 4.** Топ-5 продуктивных периодических изданий

**Table 4.** Top-5 productive periodicals

№	Название издания, страна	Квартили журналов по тематическим разделам	Кол-во работ
1	Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering	engineering, geological – Q4; geosciences, multidisciplinary – Q4	85
2	Engineering Geology	engineering, geological – Q1; geosciences, multidisciplinary – Q1	64
3	Soils and Foundations	engineering, geological – Q3; geosciences, multidisciplinary – Q3	32
4	Canadian Geotechnical Journal	engineering, geological – Q2; geosciences, multidisciplinary – Q2	28
5	Geotechnical Testing Journal	engineering, geological – Q3; geosciences, multidisciplinary – Q3	25
6	Tunnelling and Underground Space Technology	Construction & building technology – Q2; engineering, civil – Q1	24
7	Geotechnique	engineering, geological – Q1	22
8	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	engineering, geological – Q1; geosciences, multidisciplinary – Q1	22
9	Landslides	engineering, geological – Q1; geosciences, multidisciplinary – Q1	20

Значительное количество материалов по теме опубликовано в сериальных изданиях, наиболее популярными по теме являются следующие серии, каждая из которых включает не менее 10 документов по теме: *Geotechnical Special Publications, Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences, Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, American Society for Testing and Materials Special Technical Publications, Procedia Engineering, Proceedings of SPIE* и другие.

Конференции, будучи трибуной для обсуждения научных проблем и обмена мнениями между учеными и специалистами, вносят значительный вклад в информационных массив опубликованных материалов по теме (почти половина документов в БД WoS), причем все перечисленные ниже научные форумы проводятся на постоянной основе: *International IAEG Congress, International Conference on Underground Construction, World Tunnel Congress, International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, World Landslide Forum,*

*International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, International Multidisciplinary Scientific Geoconference, International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, International Pipeline Geotechnical Conference* и другие.

Тематические отобранные по теме документы распределены по 25 категориям WoS, причем основная масса работ включена в категории: *Engineering Geological* (982 – 47%), *Geosciences Multidisciplinary* (651 – 31%, *Engineering Civil* (541 – 26%) (рис. 2). Такие категории как, *Mining Mineral Resources, Construction Building Technology, Geochemistry, Geophysics, Engineering Environmental, Water Resources, Instruments. Instrumentation, Environmental Sciences, Engineering Mechanical* включают по 5-8% документов информационного массива, что составляет 100 и более работ в каждой. Прочие категории вмещают от 20 до 70 статей или 1-4% информационного массива

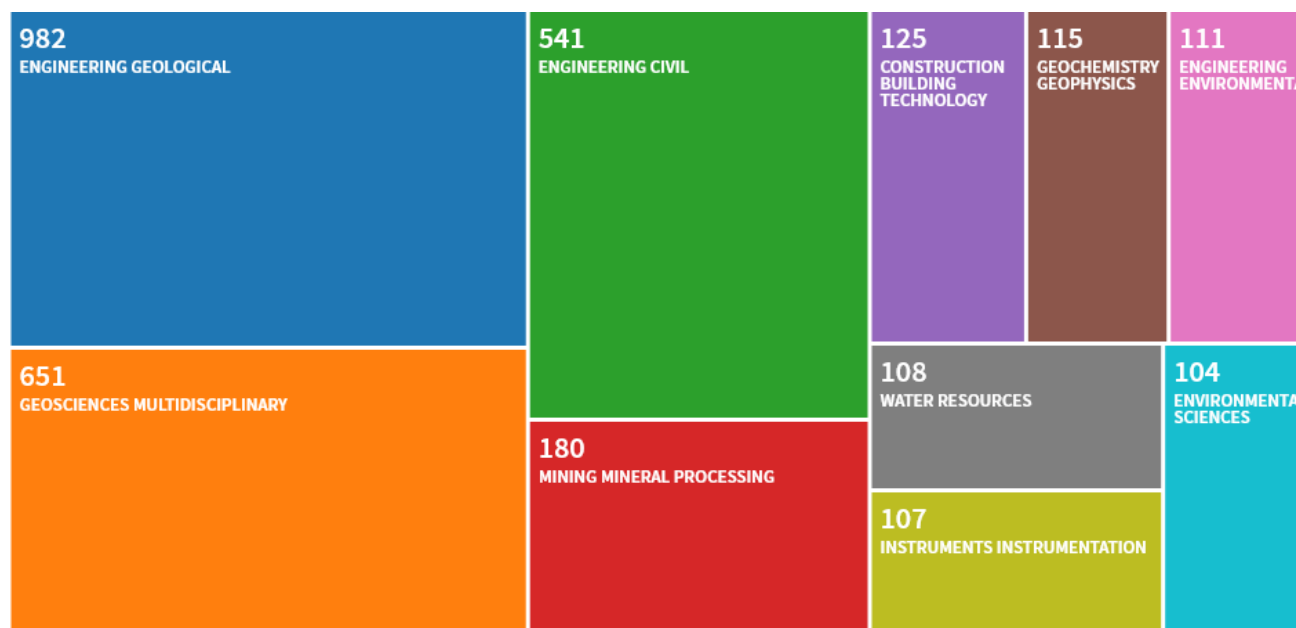


Рис. 2. Распределение документов по категориям WoS (первые 10 тематических рубрик)

Fig. 2. Distribution of documents by WoS categories (first 10 thematic headings)

### АНАЛИЗ РУССКОЯЗЫЧНОГО КОРПУСА ДОКУМЕНТОВ, ПОСВЯЩЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯМ ГЕОМОНИТОРИНГА

Как уже отмечалось работы российских авторов пока мало представлены в международных БД научного цитирования, потому что, во-первых, процесс размещения материалов российских изданий в этих БД только начался, во-вторых,

русскоязычные публикации отражаются преимущественно в российских БД: e-Library (3801), Киберленинка (662 документа), ВИТИНИ РАН (только платный доступ) и другие, у которых отсутствуют аналитические сервисы, что затрудняет анализ информационных массивов в них. Согласно данным Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) в тематическом массиве по геомониторингу БД e-Library наиболее часто цитируются работы (монографии и журнальные статьи), указанные в таблице 5

Таблица 5. Цитирование русскоязычных работ по РИНЦ (данные РИНЦ на февраль 2019 г.)

Table 5. Citing Russian works according to the Russian Science Citation Index (RSCI data, February 2019)

Кол-во цит.	Публикация	Ключевые слова автора
101	Коновалов П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М., 2000, 318 с. [10]	упрочнение оснований, усиление фундаментов, деформации, нагрузки, реконструкция зданий, давление на грунты оснований, несущая способность оснований, упрочнение грунта, уплотнение грунта, механические свойства грунтов оснований, инженерно-геологические изыскания, обследование фундаментов, геомониторинг, щелевые фундаменты, разрядно-импульсная технология, закрепление грунтов оснований, разрушение старых фундаментов, гидроизоляция, водопонижение, водоотлив

Продолжение таблицы 5

Continuation of table 5

91	Потапов А. Д. и др. Справочник геотехника М., 2014. 728 с. [11]	справочник геотехника, основания и фундаменты, подземные сооружения
77	Цветков В.Я. Геоинформационный геотехнический мониторинг. Науки о земле, 2012, № 4, 54-58 [12]	геотехническая система, геомониторинг, геотехнический мониторинг, ключевые показатели мониторинга, системный подход, поле мониторинга
59	Коновалов П.А. и др. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований. М., 2009. 336 с. [13]	промышленное строительство, специальные промышленные сооружения, резервуары, осадки оснований резервуаров, аварии резервуаров
52	Маркелов В.М., Цветков В.Я. Геомониторинг. Славянский форум. 2015, № 2, 177-184 [14]	геоинформатика, геоданные, геоинформационный мониторинг, геоинформационные технологии
52	Бедов А. И., Знаменский В. В., Габитов А. И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М., 2014. 704 с. [15]	железобетонные, каменные, армокаменные, металлические, деревянные конструкции, биоповреждения, основания зданий, свайные фундаменты, обследование оснований, геотехнический мониторинг, надежность, основания и фундаменты

Региональные материалы по геомониторингу на отдельных территориях Сибири, Дальнего Востока и Арктики включены в БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Научная Сибирь», которая в свободном доступе находится на сайте библиотеки (опции «Каталоги и базы данных» → «Библиографические БД» → «Научная Сибирь»). Материалы вышеозначенной БД систематизированы по предметным рубрикам, которые в свою очередь организованы в крупные тематические разделы, что позволяет осуществить поиск релевантной информации по теме исследования. Публикации, связанные с вопросами геотехнического мониторинга размещены в следующих разделах БД:

- Проблемы Севера: рубрики - «Проблемы строительства в условиях Севера» с подрубриками «Гражданское и жилищное строительство», «Промышленное строительство» и «Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых в условиях Севера»;

- Природа и природные ресурсы Сибири и дальнего Востока, их охрана и рациональное использование: рубрика «Геология», подрубрики «Гидрогеология. Инженерная геология. мерзлотоведение» и «Охрана недр и рациональное использование минеральных ресурсов».

БД создается в автоматизированной информационно-библиотечной системе IRBIS, в которой сервис «Статистика» позволяет провести

краткий анализ количественных показателей. Объем публикаций по региональному геомониторингу составил более 1200 документов преимущественно на русском языке. Анализ информационного массива БД «Научная Сибирь» выявил те же закономерности распределения документов по видам публикаций и во времени, которые были прослежены в тематической подборке БД WoS, что является свидетельством схожих трендов развития научных исследований по теме в России и за рубежом:

- рост информационного массива по теме с начала нынешнего столетия, особенно интенсивный - в последнее десятилетие,

- превалирование статей из периодики и материалов конференций в информационном массиве,

- тематически информационные массивы структурированы одинаково: Инженерная геология, Строительство, Охрана недр, Методика и инструментарий исследований.

Самыми продуктивными российскими журналами с материалами по проблемам геотехнического мониторинга являются следующие издания: *Инженерные изыскания, Геотехника, Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, Трубопроводный транспорт: теория и практика, Геодезия и картография, Разведка и охрана недр, Инженерная геология, Горный информационно-аналитический*

бюллетень, Основания, фундаменты и механика грунтов.

Среди авторов, работающих в области регионального геомониторинга азиатской территории России, следует упомянуть А. И. Березнякова, Л. Н. Решетникова, Л. К. Зяtkову (более 100 публикаций в БД). Вопросам геотехнического мониторинга на месторождениях и

строительных площадках Сибири, Арктики и Дальнего Востока посвящено значительное число диссертационных работ, часть из которых, защищенных в 2016-2018 гг., представлены в таблице 6. Перечень тем, выносящихся на защиту достаточно обширен, свидетельствует об активной разработке исследователями данного научного направления.

**Таблица 6.** Тематика российских диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидатов и докторов наук (2016-2018 гг.)

**Table 6.** Subjects of Russian dissertation research for the degree of candidates and doctors of sciences (2016-2018)

Год	Автор	Тема диссертации, номер специальности
2016	Борисов А.А.	Газогеохимические методы мониторинга геологической среды Верхнекамского месторождения солей: дис. ... канд. техн. наук
	Грязнев Д.Ю.	Создание и научное обоснование технологии автоматизированного мониторинга магистральных нефтепроводов на оползнеопасных участках: дис. ... канд. техн. наук
	Сергеев С.А.	Нестационарные модели компонентов системы автоматизированного мониторинга технического состояния искусственных сооружений: дис. ... канд. техн. наук
	Андрале Э.Р.М.	Методы повышения безопасности движения и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием средств аэрокосмического мониторинга: дис. ... канд. техн. наук
	Венкова Ю.А.	Мониторинг технического состояния нефтегазопроводов по индуцированной и остаточной намагниченности: дис. ... канд. техн. наук
2017	Макаров В.С.	Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон: дис. д-ра техн. наук
	Гаврилов В.А.	Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. <i>О методах комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды</i>
	Верхотуров А.А.	Разработка методики комплексного мониторинга земель в условиях воздействия активных тектонических и магматических процессов: дис. ... канд. техн. наук
2018	Антоновская Г. Н.	Сейсмический мониторинг состояния антропогенных объектов и территорий их размещения, включая Крайний Север: дис. д-ра техн. наук
	Черепанов А.О.	Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния многолетнемерзлых пород вблизи эксплуатационных скважин на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири дис. ... канд. техн. наук
	Пономаренко М.Р.	Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях Крайнего Севера с использованием космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук
	Лепехин П.П.	Комплексный мониторинг земель объектов Сахалинского нефтегазового комплекса: дис. ... канд. геогр. наук
	Исламов Р.Р.	Совершенствование системы мониторинга технического состояния протяженных участков магистральных нефтегазопроводов применением волоконно-оптических сенсоров деформаций: дис. ... канд. техн. наук

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе представлен анализ документального массива для информационного сопровождения научных исследований по теме «Геотехнический мониторинг»; прослежены тренды развития исследований по проблеме в России и мире с использованием международной базы данных Web of Science компании Thomson Reuters, Российского индекса научного цитирования (e-Library) и региональной БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Научная Сибирика», являющихся надежной информационной базой научных исследований по проблеме. Перечень продуктивных периодических и сериальных изданий, авторов с высокой публикационной активностью, наиболее цитируемых статей по означенной теме является ядром информационной компоненты перспективных научных работ по теме. Следует отметить перспективность и актуальность данной области научных исследований, о чем свидетельствует рост публикаций как в России, так и в ведущих экономически развитых государствах мира.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геотехнический мониторинг во время строительства* [Электронный ресурс] // Библиотека Санкт-Петербургского университета высоких технологий. Режим доступа: <http://tehlib.com/istrytaniya-i-obsledovaniya-zdaniy-i-sooruzhenij/geotehnicheskij-monitoring-vo-vremya-stroitelstva/> (дата обращения: 28.02.2019).
2. Бусыгина Т.В., Мандрина Л.А., Рыкова В.В. Практика библиометрических исследований в Отделе научной библиографии ГПНТБ СО РАН // Труды ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, 2015. Вып. 9. С. 20-29
3. DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36, N 2. P. 197-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>.
4. Colesanti C., Wasowski J. Investigating landslides with space-borne synthetic aperture radar (SAR) interferometry // *Engineering Geology*. 2006. Vol. 88, N 3/4. P. 173-199. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.013
5. Martin C.D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength // *Canadian Geotechnical Journal*. 1997. Vol. 34, no. 5. P. 698-725. DOI: <https://doi.org/10.1139/t97-030>.
6. Harris Ch., Arenson L.U., Christiansen H.H., Etmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauk C., Hölzle M., Humlum O., Isaksen K., Käb A., Kern-Lütschg M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J.B., Nötzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M., Vonder Mühl D. Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses // *Earth-*

*Science Reviews*. 2009. Vol. 92, N 3/4. P. 117-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscrev.2008.12.002>.

7. DeJong J.T., Soga K., Kavazanjian E., Burns S., Van Paasen L.A., Al Qabany A., Aydilek A., Bang S.S., Burbank M., Caslake L.F., Chen C.Y.[et al.]. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges // *Geotechnique*. 2013. Vol. 63, N 4. P. 287-301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>.

8. Angeli M.G., Pasuto A. Silvano S. A critical review of landslide monitoring experience // *Engineering Geology*. 2000. Vol. 55, N 3. P. 133-147. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00122-2.

9. Wasowski J., Bovenga F. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: current issues and future perspectives // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 174. P. 103-138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>.

10. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 4-е изд. Москва: ВНИИТПИ, 2000. 318 с.

11. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / ред. В. А. Ильичев, Р.А. Мангушев. Москва: АСВ, 2014. 728 с.

12. Цветков В.Я. Геоинформационный геотехнический мониторинг // *Науки о земле*. 2012. № 4. С. 54-58.

13. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / П. А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С. Н. Сотников, А.А. Землянский, А.А. Тарасенко. Москва: АСВ, 2009. 336 с.

14. Маркелов В.М., Цветков В.Я. Геомониторинг // *Славянский форум*. 2015. № 2. С. 177-184.

15. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : учеб. пособие. Москва: АСВ, 2014. 704 с.

## REFERENCES

1. Geotechnical monitoring during construction [Electronic resource]. Biblioteka Cankt-Peterburgskogo universiteta vysokikh tekhnologii. URL: <http://tehlib.com/istrytaniya-i-obsledovaniya-zdaniy-i-sooruzhenij/geotehnicheskij-monitoring-vo-vremya-stroitelstva/> (accessed: 02.02.2019). (In Russian)
2. Busygina T.V., Mandrinina L.A., Rykova V.. Practice of Bibliometric Studies in the Department of Scientific Bibliography of SPSTL SB RAS. Tudy GPNTB SO RAN. Novosibirsk, 2015. Vol. 9, pp. 20-29. (In Russian)
3. DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36, N 2. P. 197-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>.
4. Colesanti C., Wasowski J. Investigating landslides with space-borne synthetic aperture radar (SAR) interferometry // *Engineering Geology*. 2006.

Vol. 88, N 3/4. P. 173-199. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.013.

5. Martin C.D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength // *Canadian Geotechnical Journal*. 1997. Vol. 34, no. 5. P. 698-725. DOI: <https://doi.org/10.1139/t97-030>.

6. Harris Ch., Arenson L.U., Christiansen H.H., Eitzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauk C., Hölzle M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Lütschg M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J.B., Nötzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M., Vonder Mühll D. Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses // *Earth-Science Reviews*. 2009. Vol. 92, N 3/4. P. 117-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>.

7. DeJong J.T., Soga K., Kavazanjian E., Burns S., Van Paasen L.A., Al Qabany A., Aydilek A., Bang S.S., Burbank M., Caslake L.F., Chen C.Y.[et al.]. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges // *Geotechnique*. 2013. Vol. 63, N 4. P. 287-301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>.

8. Angeli M.G., Pasuto A. Silvano S. A critical review of landslide monitoring experience // *Engineering Geology*. 2000. Vol. 55, N 3. P. 133-147. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00122-2.

9. Wasowski J., Bovenga F. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal

interferometry: current issues and future perspectives // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 174. P. 103-138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>.

10. Kononov P.A. *Osnovaniya i fundamentey rekonstruirovannykh zdaniy* [Bases and foundations of reconstructed buildings]. 4th ed. Moscow: VNIINTPI, 2000. 318 p. (In Russian)

11. Il'ichyov V.A., Mangushev R.A. (eds.) *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamentey i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnical engineering. Bases, foundations and underground structures]. Moscow: ASV, 2014. 728 p. (In Russian)

12. Tsvetkov V.Y. GIS geotechnical monitoring. *Nauki o zemle*. 2012. N 4, pp. 54-58. (In Russian)

13. Kononov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N., Zemlyanskii A.A., Tarasenko A.A. *Fundamentey stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovanii* [Foundations of steel tanks and deformation of their bases]. Moscow: ASV, 2009. 336 p. (In Russian)

14. Markelov V. M., Tsvetkov V. Ya. Geomonitoring. *Slavyanskii forum*. 2015. N 2, pp. 177-184.

15. Bedov I.A., Znamenskii V.V., Gabitov A.I. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovlenie i usilenie osnovanii i stroitel'nykh konstruksii ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenii* : ucheb. posobie [Evaluating technical condition, rehabilitation and strengthening foundations and building structures of exploited building and structures]. Moscow: ASV, 2014. 704 p. (In Russian)

## GEOTECHNICAL MONITORING: DOCUMENTS ANALYSIS OF RUSSIAN AND FOREIGN DATABASES

Rykova V.

**Summary** The author analyzes information arrays on problems of geotechnical monitoring in Russia and the worldwide using the international database Web of Science of Thomson Reuters, the Russian Science Citation Index (e-Library) and the regional database "Scientific Sibirika" of the State Public Scientific Technological Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences' own generation using bibliometric methods.

Information arrays are selected from the above mentioned databases, which are bibliographic databases, free access to the full texts in them is possible only for a part of the documents, most of the information is available under license.

Bibliometric analysis of information arrays is carried out using the databases' analytical services, the analysis results are presented in the form of graphs and tables.

The paper reveals trends in the research development on the problem in Russia and the world; demonstrates the contribution of different countries and scientific organizations in the development of this research field; compiles a list of the most productive periodicals and serials, including materials on geotechnical monitoring. The article carries out the analysis of publication activity of authors, shows the most cited articles of the English-speaking and Russian-speaking corpus of documents on the designated subject, and as well the topics of Russian dissertation researches for the last three years.

The concludes on prospects and relevance of this research area, as evidenced by the active growth in the number of publications on the topic both in Russia and in the leading economically developed countries of the world.

**Key words:** geotechnical monitoring, information support, database Web of Sciences, Russian science citation index e-Library, database "Scientific Sibirika".

СПИСОК АВТОРОВ

**Аверкова О. А.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплогасоснабжения и вентиляции» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова.

**Андрианов А. П.**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

**Бекиров Э.А.**, доктор технических наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Быков М.А.**, канд. физ.-мат. наук, доцент каф. электроэнергетики и электротехники Физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: аморфные тонкопленочные фотопреобразователи.

**Гиря Л.В.**, доцент, кандидат технических наук Донской государственный технический университет.

**Гоглев И.Н.**, аспирант кафедры nano технологий, физики и химии, Ивановский государственный политехнический университет.

**Головченко И.В.**, кандидат наук, доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Грушко И.С.**, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск.

**Дронова А. В.**, доцент кафедры начертательная геометрия и графика, БГТУ им. Шухова.

**Дьяков И.М.**, к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Живица В.В.**, старший преподаватель кафедры градостроительства, архитектурно-строительный факультет, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Зиганшин А.М.**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет.

**Конопацкий Е.В.**, К.т.н., доцент, доцент кафедры специализированных информационных технологий и систем, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры».

**Казьмина А. И.**, доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Корой Е.И.**, ассистент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Крысько А. А.**, к.т.н., доцента кафедры "Специализированные информационные технологии и системы" ГОУВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры.

**Кувшинов В.В.**, аспирант ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

**Логачев К. И.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплогасоснабжения и вентиляции» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова.

**Логинова С.А.**, ст. преподаватель кафедры nano технологий, физики и химии, ИВГПУ.

**Любомирский Н.В.**, доктор технических наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Мазин Алим Сеит-Аметович**, канд. тех. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: тонкопленочные структуры, nano размерная электроника.

**Муровский С.П.**, кандидат технических наук, доцент Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Николаенко В.В.**, кандидат технических наук, доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь .

**Николаенко Е.Ю.**, кандидат технических наук, доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь Скуратов С.В.

**Первов А. Г.**, доктор технических наук, профессор кафедры «водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

**Ротков С. И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования.

**Румянцева В.Е.**, Советник РААСН, д.т.н, профессор, зав. кафедрой нано технологий, физики и химии, ИВГПУ.

**Рыкова В.В.**, старший научный сотрудник отдела научной библиографии, Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сокут Л.Д.**, кандидат технических наук, доцент Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Тищенко И. В.**, доцент кафедры начертательная геометрия и графика, БГТУ ми. Шухова.

**Федюшко Ю.М.**, д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Академия строительства и архитектуры

**Чичерин С. В.**, аспирант, Омский государственный университет путей сообщения, кафедра «Теплоэнергетика.

**Шаленный В.Т.**, доктор технических наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.

**Шевченко А.И.**, канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: полупроводниковые материалы.

**Шейна С. Г.**, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

**1. Прием статей в редакцию и состав сопроводительных документов**

Прием статей для публикации в журнале осуществляется в постоянном режиме. Процесс рассмотрения статьи, рецензирования и редакционно-издательской обработки занимает достаточно длительное время, в связи с чем поступившая и допущенная редколлегией к публикации статья будет, как правило, опубликована не ранее, чем через 4 месяца со дня ее поступления. Датой поступления статьи будет считаться дата ее получения от автора в окончательном варианте после всех доработок и исправлений по замечаниям рецензентов и редактора.

Просим авторов тщательно готовить свои материалы с целью сокращения сроков их рассмотрения и обработки.

*Неправильно оформленные материалы не рассматриваются, не рецензируются и не возвращаются!* Также не возвращаются авторам рукописи статей и электронные копии на локальных носителях. При этом редакция по собственной инициативе в переговоры с авторами не вступает.

1.1. Прием статей на рассмотрение и рецензирование осуществляется через онлайн систему приема статей и по электронному адресу [stepancova.natal@mail.ru](mailto:stepancova.natal@mail.ru).

Прием статей на рассмотрение и рецензирование через онлайн систему приема статей производится на сайте журнала по адресу: <https://stroyjurnal-asa.ru>. Инструкция по использованию системы доступна на сайте. Автор имеет возможность следить за продвижением статьи в редакции в личном кабинете и получает соответствующие уведомления по электронной почте.

Так же прием статей на рассмотрение и рецензирование можно направить по электронной почте по адресу [stepancova.natal@mail.ru](mailto:stepancova.natal@mail.ru). Все вопросы и пожелания необходимо отправлять на этот адрес электронной почты редакции. (смотреть пункт 1.3).

Все поступившие в редакцию статьи проходят обязательное двойное слепое рецензирование. По результатам рецензирования автору сообщается решение о публикации, замечания рецензента и редактора или решение об отклонении статьи.

**1.2. Прием к публикации окончательного варианта статьи.** Окончательный (после внесения правки по замечаниям рецензентов и редактора) вариант статьи автор также загружает через систему или направляет на электронный адрес [stepancova.natal@mail.ru](mailto:stepancova.natal@mail.ru) для ее редактирования, корректуры, верстки и публикации в журнале.

**1.3. Прием пакета сопроводительных документов** осуществляется через онлайн систему приема статей и по электронному адресу [lisa.858@yandex.ru](mailto:lisa.858@yandex.ru).

Автор, пройдя регистрацию в системе, загружает статью в формате .doc или .docx, форматированную по шаблону (см. п. 2), вместе с файлами отсканированных документов: экспертного заключения о возможности опубликования в открытой печати (далее – экспертного заключения) и информации об авторах статьи.

Экспертное заключение оформляется по требованиям, установленным в организации – работодателе автора. Редакция исходит из того, что авторы добровольно предоставляют сведения о себе в анкете автора в требуемом объеме и составе (в соответствии с правилами для публикаций научных статей в журналах, включенных в Перечень ВАК) для их открытого опубликования. Также к загружаемой статье может быть приложен файл отсканированной внешней (т.е. из сторонней организации) рецензии (1 экз.), оформленной и заверенной в организации по месту работы рецензента. Оригинал рецензии присылать в редакцию по почте не требуется. Сопроводительные документы можно направить по электронной почте по адресу [lisa.858@yandex.ru](mailto:lisa.858@yandex.ru). Все вопросы и пожелания относительно пакета документов необходимо отправлять на этот адрес электронной почты редакции.

Пакет оригиналов сопроводительных документов, включающий информационную карту статьи на публикацию сведений об авторе и экспертное заключение, должен поступить в редакцию по почте не позднее 3 недель со дня уведомления автора (письмом на адрес электронной почты) о положительном решении по поводу публикации статьи.

**Бланки сопроводительных документов и требования:**

**Информация об авторах статьи.** Информация об авторах статьи загружается в систему OJS или отправляется на адрес электронной почты [stepancova.natal@mail.ru](mailto:stepancova.natal@mail.ru) в электронном виде в виде файла с расширением .doc или .docx;

**Бланк экспертного заключения и авторской справки** (только для авторов – работников КФУ им. В.И. Вернадского (распечатывается и заполняется вручную)

**Бланк экспертного заключения и Внешняя рецензия** – загружается в систему OJS или отправляется на адрес электронной почты [stepancova.natal@mail.ru](mailto:stepancova.natal@mail.ru) в сканированном виде (файл PDF).

## 2. Требования к оформлению статей

Статья будет рассмотрена редколлегией и рецензентами только при условии полного соответствия ее оформления изложенным ниже требованиям, предъявляемым к публикациям в научных журналах, индексируемых международными базами научного цитирования.

Все статьи, поступившие в редакцию журнала, получившие положительную оценку рецензентов и рекомендованные к публикации, проходят обязательную редакционную обработку (редактирование, корректуру, техническое редактирование). Внесение правки по замечаниям редактора согласовывается с автором.

Датой поступления статьи в редакцию считается дата поступления и регистрации в редакции окончательного авторского оригинала с учетом всех внесенных изменений по замечаниям рецензентов и редактора.

### Общие требования для подготовки статей

**Объем статьи**, включая таблицы, рисунки и фотографии должен быть не менее 6 страниц и не превышать 10 страниц.

**Шрифт.** Нормальный Times New Roman (TNR), размер шрифта – 10 пт, одинарный интервал; интервал шрифта – обычный (без растяжения или уплотнения). Варианты шрифта в тексте статьи: типа курсива или жирного шрифта допускаются, подчеркивание слов и предложений не допускаются.

**Параметры страницы:** верхнее поле – 2,5 см, нижнее – 2,5 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см.

**Таблицы.** Таблица озаглавляется словом Таблица 1 (шрифт – обычный TNR 10 пт, по центру) со следующим за ним номером с точкой. Далее помещается название таблицы с прописной буквы (не более 3-х строк), без заключительной точки. Ниже приводится название таблицы на английском языке. Размер таблиц и рисунков не должен превышать размер B5 (12,5 × 19,5 см). Шрифт заголовков столбцов и строк, содержания таблицы – обычный TNR 9 пунктов. Таблицы нумеруются арабскими цифрами.

**Рисунки и графики.** Рисунки и графики озаглавляются словом Рис.1 (шрифт – обычный TNR 9 пунктов) со следующим за ним номером с точкой. Рисунки выполняются в графических редакторах, совместимых с Word и размещаются по тексту. Под рисунком помещается подпись на русском и английском языках. Короткая подпись центрируется, а если длинная – форматируется с абзацем первой строки. Качество рисунков и графиков должно обеспечивать прочтение и тиражирование. Рисунки и графики нумеруются арабскими цифрами.

**Формулы.** Формулы набираются в редакторе формул Equation или Math Type. Использовать для набора формул графические объекты, кадры и таблицы запрещается. Формула располагается по центру строки, номер формулы (в круглых скобках, TNR 10 пт) – по правому краю страницы, от окружающего текста отделяется пустыми строками. Формульное окно принудительно растягивать или сжимать нельзя. Применение единиц измерений в международной системе СИ – обязательно.

### Обязательный порядок статьи.

- **УДК** в левом верхнем углу страницы, шрифт TNR 12 пт, прописными буквами
- **Название статьи шрифт** TNR 12 пт все прописными.
- **Имя и фамилия** автора(ов), шрифт обычный TNR 12 пт.
- **Место работы** авторов, шрифт обычный TNR 9 пт., адрес места работы, e-mail
- **Аннотация статьи (Abstract)** 200 – 250 слов, шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Предмет исследования (Subject):** шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Материалы и методы (Materials and methods):** шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Результаты (Results):** шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Выводы (Conclusions):** шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Ключевые слова (Key words)** до 6 слов и словосочетаний, необходимых для поиска или классификатора, шрифт обычный TNR 9 пт.
- **Текстовая часть.** Статья должна содержать следующие разделы:
  - ВВЕДЕНИЕ;
  - АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ;
  - МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ;
  - РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ;
  - ВЫВОДЫ;
  - СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

Заголовки разделов набираются строчными буквами, шрифт TNR 11 пунктов и центрируются.

В конце статьи размещается **Название статьи, Имя и фамилия автора(ов), Место работы авторов, Аннотация статьи, Предмет исследований, Материалы и методы, Результаты, Выводы, Ключевые слова** на английском языке с сохранением редакторских требований, указанных выше к каждому структурному элементу статьи.

### **Рекомендации по подготовке аннотации статьи**

Аннотация выполняет следующие основные функции:

- дает возможность читателю быстро оценить основное содержание статьи с тем, чтобы решить, следует ли ему обращаться к ее полному тексту;
- предоставляет читателю самую общую информацию о статье, устраняя необходимость чтения ее полного текста в случае, если статья представляет для читателя второстепенный интерес;
- используется в научных, библиотечных и поисковых информационных системах.

Аннотация к статье должна быть:

- информативной (не содержать общих слов);
- содержательной (отражать основное содержание статьи);
- структурированной (следовать логике изложения материала в статье);

Аннотация должна включать в себя:

- предмет и цель работы (если они не следуют из названия статьи);
- используемый метод или методы исследования;
- основные результаты исследования;
- отличия данной публикации от других, схожих по теме;
- область применения результатов;
- выводы, рекомендации, перспективы развития работы.

В аннотации следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...», «автор полагает...» и т.д.), а также сложных грамматических конструкций. Аннотацию следует писать как можно более лаконичным, точным и простым языком. Должна быть понятна широкому кругу читателей, поэтому не должна изобиловать научными терминами. Следует избегать общеизвестных сведений и штампов. Аннотация не должна включать в себя цитаты из текста статьи. В аннотации обычно используются конструкции констатирующего характера (автор анализирует, доказывает, излагает, обосновывает и т. д.), а также оценочные стандартные словосочетания (уделяет основное внимание, важный актуальный вопрос, проблема, детально анализирует, убедительно доказывает).

### **Список литературы оформляется на русском и английском языках.**

Библиографическое описание выполняется по:

- ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание;
- ГОСТ 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления;
- ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов;
- Регламент включения научных журналов в Российский индекс научного цитирования. – М., 2008.

*Не менее 12 источников, с ссылками на статьи в предыдущих выпусках сборника «Строительство и техногенная безопасность», в которых не участвовали авторы представленной статьи.*

### **Рекомендации по подготовке списка литературы**

- Цитирование двух или более источников под одним номером, одного и того же источника под разными номерами не допускается.
- Во всех источниках необходимо указывать фамилии и инициалы всех авторов.
- Ссылки на книги, переведенные на русский язык, должны сопровождаться ссылками на оригинальные издания с указанием выходных данных оригинального издания.
- Ссылки на книги должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название книги, город, год, количество страниц.

- Ссылки на статьи в журналах должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год, том (если указан), номер, страницы (первая и последняя, разделенные тире).
- Ссылки на сборники (конференции, симпозиумы) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), количество страниц.
- Ссылки на статьи в сборниках (материалах конференций, симпозиумов) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название статьи, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), страницы (первая и последняя, разделенные тире).
- Ссылки на электронные ресурсы удаленного доступа должны содержать следующую обязательную информацию: название ресурса, режим доступа, дата обращения.
- В инициалах авторов между именем и отчеством пробел не ставится.
- В заголовке описания запятая после фамилии автора перед его инициалами может быть опущена.
- Если в документе один, два или три автора, то в сведениях об ответственности (т.е. за косой чертой после названия документа) они могут не повторяться.
- При наличии **четырёх и более** авторов в сведениях об ответственности (т.е. за косой чертой после названия документа) приводят фамилии **всех** авторов.
- Допускается предписанный знак точку и тире, разделяющий области библиографического описания, заменять точкой.
- Допускается не использовать квадратные скобки для сведений, заимствованные не из предписанного источника информации.

#### **НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:**

1. Включать в список литературы ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНИПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях или расчетах или аргументации лучше делать непосредственно по тексту статьи.
2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.
3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.
4. Самоцитирование, т.е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных показателей автора.