

# СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

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

№ 37(89) – 2025

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» (ФГАОУ ВО «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 утверждённый ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата наук, доктора наук

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

Редакционная коллегия:  
**Абдулгасис У.А.**, д.т.н., проф. (КИПУ, Симферополь)  
**Аверкова О.А.**, д.т.н., проф. (БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород);  
**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»;  
**Гузнецков 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»;  
**Маилян Д.Р.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-  
Дону);  
**Нагаева З.С.**, член-корреспондент РААСН, д.арх., проф. –  
руководитель раздела «Градостроительство»  
**Невзоров А.Л.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (САФУ им. М.В.  
Ломоносова, Архангельск);  
**Несветаев Г.В.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-  
Дону);  
**Пищулина В.В.**, д.арх., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);  
**Сергейчук О.В.**, д.т.н., проф. (КНУСА, Киев, Украина);  
**Скибин Г.М.**, д.т.н., проф. (ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова,  
Новочеркасск);  
**Тер-Мартirosян А. З.**, д.т.н., проф. (НИУ МГСУ, Москва)  
**Толстой М.Ю.**, к.т.н., доц. (ИРНИТУ, Ижевск);  
**Федосов С.В.**, академик РААСН, д.т.н., проф. (МГСУ, Москва)  
**Федюк Р.С.**, советник РААСН, д.т.н., доцент (ДВФУ, Владивосток);  
**Фесенко Л.Н.**, д.т.н., проф. (ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова,  
Новочеркасск);  
**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);  
**Шаленный В.Т.**, д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,  
Симферополь) – руководитель раздела «Строительство»;  
**Шейна С.Г.**, советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-  
Дону);  
**Щербачков В.И.**, д.т.н., доц. (ВГТУ, Воронеж);  
**Югов А.М.**, д.т.н., проф. (ДОННАСА, Макеевка)

## СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 37(89) – 2025  
научно-технический журнал

Печатается по решению научно-технического  
совета ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
(протокол № 6 от 27.06.2025)

Координатор выпуска: *И.В. Николенко*  
Верстка: *Г.Р. Биленко*

Редакция Института «Академия строительства и  
архитектуры» ФГАОУ ВО «КФУ им.  
В.И. Вернадского»

Адрес редакции: 295006, Республика Крым,  
г. Симферополь, ул. Павленко, д. 3  
e-mail: [rio@narps.ru](mailto:rio@narps.ru)

Подписан в печать 30.06.2025.  
Формат А4.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Гарнитура Times New Roman. Усл.-печ. л. 10,97.  
Тираж 100 экз.  
Дата выхода в свет 01.07.2025

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\\_cfuv@mail.ru](mailto:io_cfuv@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»  
Адрес типографии 295000, Республика Крым,  
г. Симферополь, бульвар Ленина, 5/7

Распространяется бесплатно.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **Раздел 1. Градостроительство**

*Нагаева З.С., Альчиков Р.Л., Куртбединова М.Э.*

МЕЖДУНАРОДНОЕ ПРАВО И ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И РЕСПУБЛИКИ КРЫМ В СФЕРЕ ОХРАНЫ И СОХРАНЕНИЯ ИСТОРИЧЕСКОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Г. БАХЧИСАРАЙ 5

### **Раздел 2. Строительство**

*Перминов Д.А.*

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕННОГО ЗДАНИЯ 17

*Царёва О.С., Козодаева В.С., Андреев В.М., Свириденко Д.А.*

УЗЛОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СТАЛЬНЫХ МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЯХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРЕСЕЛЕНИЯ ИЗ АВАРИЙНОГО И ВЕТХОГО ЖИЛЬЯ 25

*Богущая А.Ю., Чаплыгин В.А., Шаленный В.Т.*

ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ ШЕСТИМЕТРОВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РЕБРИСТЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ СТАЛЬНЫМИ БАЛКАМИ-ШПРЕНГЕЛЯМИ ОРИГИНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ 35

*Бородин С.С., Федоркин С.И., Макарова Е.С.*

КАРБОНИЗАЦИЯ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И СВЕЖЕОТФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННОЙ ВИБРОПРЕССОВАННОЙ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ 43

*Дворецкий А.Т., Завалий А.А., Шубин И. Л.*

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗЕРКАЛЬНОГО КУБА 51

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

*Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Бекиров О.С.*

АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КРЫМА 59

*Гавриш В.М., Чайка Т.В., Корсак Д.В., Чайка А.К.*

МОДИФИКАЦИЯ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ПОРОШКОМ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА WO<sub>3</sub>, ОБЛАДАЮЩИМ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ 67

*Гусенцова Я.А., Красногрудов А.В., Родыгина М.М., Высоцкая Н.Д.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГОЛЬНЫХ АДСОРБЕРОВ 77

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

*Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В.*

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА В ПРОЦЕССЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ 85

*Список авторов*

91

*Руководство для авторов*

92

## **CONTENT**

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

<i>Nagaeva Z.S., Alchikov R. L., Kurtbedinova M. E.</i> INTERNATIONAL LAW AND LEGISLATION OF THE RUSSIAN FEDERATION AND THE REPUBLIC OF CRIMEA IN THE FIELD OF PROTECTION AND PRESERVATION OF THE HISTORICAL URBAN ENVIRONMENT OF THE CITY OF BAKHCHISARAI	5
---	---

### **Section 2. Construction**

<i>Perminov D.A.</i> CALCULATION ANALYSIS OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STONE BUILDING ELEMENTS	17
<i>Tsareva O.S., V.S. Kozodaeva, V.M. Andreev, D.A. Sviridenko.</i> NODAL SOLUTIONS IN STEEL MODULAR BUILDINGS FOR RESETTLEMENT FROM EMERGENCY AND DILAPIDATED HOUSING	25
<i>Bogutskaya A.Y., Chaplygin V.A., Shalenny V.T.</i> TECHNOLOGY OF REINFORCEMENT OF SIX-METER REINFORCED CONCRETE RIBBED SLABS WITH STEEL BEAMS-SPANGLES OF THE ORIGINAL DESIGN	35
<i>Borodin S.S., Fedorkin S.I., Makarova E.S.</i> CARBONATION OF THE RAW MATERIAL MIXTURE AND FRESHLY MOLDED PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF CONCRETE VIBROPRESSED PAVING SLABS	43
<i>Dvoretzky A.T., Zavaliy A.A., Shubin I. L.</i> THERMAL CONDITIONS OF THE MIRROR CUBE	51

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

<i>Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Bekirov O.S.</i> ANALYSIS OF INDUSTRIAL TESTS OF MODULAR REACTIVE POWER COMPENSATOR AT CRIMEAN WIND FARMS	59
<i>Gavriush V.M., Chayka T.V., Korsak D.V., Chayka A.K.</i> MODIFICATION OF THE CEMENT MATRIX WITH A HIGHLY DISPERSED WO <sub>3</sub> TUNGSTEN OXIDE POWDER WITH PHOTOCATALYTIC PROPERTIES	67
<i>Gusentsova Ya, A., Krasnogradov A.V., Rodygina M.M., Vysotskaya N.D.</i> EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF COAL ADSORBERS	77

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

<i>Chemodurov V. T., Litvinova E. V.</i> SOIL MOVEMENT MODEL DURING SEISMIC ACTIVITY	85
<i>List of authors</i>	91
<i>Authors Guide</i>	92

## Раздел 1. Градостроительство

УДК 69.009

### МЕЖДУНАРОДНОЕ ПРАВО И ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И РЕСПУБЛИКИ КРЫМ В СФЕРЕ ОХРАНЫ И СОХРАНЕНИЯ ИСТОРИЧЕСКОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Г. БАХЧИСАРАЙ

Нагаева З.С., Альчиков Р.Л., Куртбединова М.Э.

АНО Центр научно-инновационного развития архитектуры и искусства,  
295023, Республика Крым, г Симферополь, Родниковый пер, д.13  
e-mail: zarema.nagaeva@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье исследуются вопросы международного права и законодательства Российской Федерации и Республики Крым в контексте охраны и сохранения исторической городской среды г. Бахчисарай. Авторами проанализированы международные договоры, нормативные акты уровня Российской Федерации, Республики Крым и муниципального образования г. Бахчисарай, касающиеся защиты культурного наследия, и рассмотрено их применение на практике.

**Предмет исследования:** законодательство в сфере охраны и сохранения исторической городской среды г. Бахчисарай.

**Материалы и методы.** В процессе исследования применялись следующие методы: анализ научных, литературных, практических источников, архивный поиск.

**Результаты.** Установлено, что к доступным инструментам регулирования развития городской среды г. Бахчисарай относятся: концепция градостроительных регламентов; система защитного зонирования архитектурных памятников с буферными зонами; статус исторического поселения; статус достопримечательного места; статус историко-культурного заповедника; концепция зон с особой архитектурно-планировочной организацией территории; приватизация исторических сооружений местного значения с утверждением охранного обязательства собственников; включение исключительных памятников истории и культуры (комплекс Ханского дворца, средневековый город Чуфут-Кале) в список всемирного наследия ЮНЕСКО.

**Выводы.** В нормативно-правовой базе Российской Федерации имеется ряд положений и методов, с помощью которых представляется возможным обеспечить охрану культурного наследия г. Бахчисарай. Российская Федерация ратифицировала соответствующие Конвенции ООН в области охраны культурного наследия, соблюдение которых способствует развитию исторической городской среды г. Бахчисарай. Формирование комплексного подхода к сохранению и развитию исторической городской среды позволит сохранить уникальное культурное наследие и повысить туристическую привлекательность и социально-экономическую стабильность региона.

**Ключевые слова:** г. Бахчисарай, градостроительная структура, международное право, законодательство Российской Федерации, охрана объектов культурного наследия, архитектурное наследие, историческое поселение

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования темы охраны и сохранения исторической городской среды г. Бахчисарай обусловлена уникальным культурным и историческим наследием данного региона, которое представляет собой синтез различных цивилизаций и эпох. Бахчисарай, как один из центров

Крымского Ханства, обладает значительным архитектурным и историческим потенциалом, который требует системного подхода к его защите и сохранению. Данное исследование направлено на формирование комплексного подхода к вопросам охраны исторической городской среды, что имеет важное значение не только для сохранения культурного наследия, но и для развития туристической привлекательности региона, а также укрепления его социально-экономической стабильности.

Целью данной статьи является анализ законодательства Российской Федерации и международных норм в области охраны исторической городской среды Бахчисарая.

Постановка задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо

изучить основные международные правовые акты, касающиеся охраны культурного наследия, а также законодательство Российской Федерации в сфере охраны исторической городской среды; оценить текущее состояние охраны исторической среды г. Бахчисарай с точки зрения соблюдения международных стандартов.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Многие проблемы, рассматриваемые в статье, исследованы специалистами в ряде научно-исследовательских работ. Исследованием различных аспектов формирования и развития исторической среды в рамках законодательства Российской Федерации занимались Шевченко Э. А. [1], Субботин О.С. [2], Бурмистрова Е. А. [3], Марушина Н., Назарова А., Пасечник И. [4]. Зарубежные примеры сохранения исторической городской среды методами нормативно-правового регулирования рассматриваются в работах Науменко В. Е. [5], Литвиновой О.Г. [6].

Международные акты и конвенции – [7], [8], [9], [10], [11].

Законодательство Российской Федерации федерального уровня – [12], [13], [14], [15], [22],

[23], [31].

Законодательство Российской Федерации уровня субъекта (Республики Крым) – [16], [17], [18], [21].

Законодательство Российской Федерации муниципального уровня (г. Бахчисарай) – [20], [25], [26], [27].

### Материалы и методы исследований

В процессе исследования применялись следующие методы: анализ научных, литературных, практических источников, архивный поиск.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Российская Федерация является участником ряда международных конвенций об охране культурного наследия. Многие из них подписаны, но лишь некоторые ратифицированы и стали составной частью российского законодательства об охране историко-культурного наследия. Следующие международные соглашения ратифицированы Российской Федерацией [7]:

1. Конвенция ЮНЕСКО 1972 г. об охране всемирного культурного и природного наследия. Основная цель Конвенции – объединение усилий международного сообщества для выявления, охраны и всесторонней поддержки выдающихся в мировом масштабе памятников культуры и природных объектов.

2. Рекомендации Комиссии Европейских Сообществ о защите архитектурного и природного наследия (1974 г.) – предлагает перечень стандартов и методов, благоприятных для использования при работах по сохранению архитектурного наследия.

3. Европейская Конвенция 1985 г. «Об охране архитектурного наследия Европы». Цель данной Конвенции – обеспечение охраны археологического наследия как источника Европейской коллективной памяти и инструмента исторических и научных исследований.

4. Конвенция 1954 г. «О защите культурных ценностей в случае вооруженного конфликта» (Гаагская) [8] – призвана стимулировать принятие мер по защите культурного наследия от последствий вооруженного конфликта.

5. Конвенция 1970 г. «О мерах, направленных на запрещение и предупреждение незаконного ввоза, вывоза и передачи права собственности на культурные ценности» (Парижская) [9] – призвана защитить культурное наследие от незаконных раскопок и контрабанды культурных ценностей.

6. Декларация о преднамеренном разрушении культурного наследия (2003 год) [10] – обозначает важность защиты объектов культурного наследия от актов преднамеренного разрушения.

В 2011 году один из комитетов ИКОМОС (CIVVIH)<sup>1</sup> издал свод рекомендаций по управлению историческими городами – «Принципы Валлетты». Данный документ предлагает наиболее актуальные

подходы, а также определяет «задачи, позиции и инструменты» [11] сохранения и развития исторических городов с учетом современных вызовов и новейших достижений в методологии управления.

Принципы Валлетты определяют своей основной целью «предложить принципы и стратегии, применимые к каждому вмешательству в исторические города и урбанизированные территории <...> для охраны ценностей исторических городов и их окружения, а также их интеграции в современную социальную, культурную и экономическую жизнь» [11]. Такой подход призван улучшить уровень жизни населения города с помощью развития местной материальной и нематериальной культуры [11].

Важнейшей задачей государственной власти является поддержание сохранности и подлинности богатого культурного наследия Республики Крым на уровне международных стандартов.

Основополагающими документами федерального уровня, регулирующими совершенствование и развитие градостроительной среды исторического города, в частности, г. Бахчисарай, являются следующие:

1. Градостроительный кодекс от 22.12.2004 № 190-ФЗ (ст. 35, 36, 52). Кодекс устанавливает обязательства в отношении лиц, осуществляющих строительные работы вблизи объектов культурного наследия: «лицо, осуществляющее строительство, обязано обеспечивать сохранность объектов культурного наследия» [12, п. 6 ст. 52]. Также, согласно Кодексу, при обнаружении в процессе выполнения строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта, обладающего признаками объекта культурного наследия, лицо, осуществляющее работы, должно немедленно приостановить их и известить об обнаружении органы, предусмотренные законодательством РФ об объектах культурного наследия. [12, п. 8 ст. 52]

2. Земельный кодекс от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ст. 99). Земельный кодекс Российской Федерации устанавливает понятие земель историко-культурного назначения, к которым относятся «земли объектов культурного наследия, достопримечательных мест, а также военных и гражданских захоронений» [13, п. 1.1-1.3 ст. 99].

3. Федеральный Закон Российской Федерации от 25.06.2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» [14] (ст. 3, 34, 47, 56.4, 57, 59, 60). В настоящее время этот закон является основным законодательным актом, регулирующим государственную охрану культурного наследия.

4. Федеральный Закон Российской Федерации от 12.02.2015 № 9-ФЗ «Об особенностях правового регулирования отношений в области культуры и туризма в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в

<sup>1</sup> CIVVIH – один из 26 научных комитетов ICOMOS, Международного комитета по памятникам и достопримечательным местам, общественной организации,

объединяющей профессионалов разных стран, главного эксперта ЮНЕСКО по вопросам охраны наследия.

составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя» [15] – устанавливает особенности правового регулирования отношений в области культуры и туризма в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым. Согласно Закону, границы и особый режим использования территорий, установленные в целях государственной охраны объектов культурного наследия, расположенных на территориях Республики Крым и города федерального значения Севастополя, до принятия Республики Крым в состав Российской Федерации, действуют до их приведения в соответствие с законодательством Российской Федерации.

На уровне Правительства Республики Крым разработаны следующие нормативно-правовые акты:

1. Закон Республики Крым «Об объектах культурного наследия в Республике Крым» от 11.09.2014 №68-ЗРК (ред. от 12.04.2022) (ст. 44). Данный закон носит фундаментальный характер в правовом поле Республики Крым. Согласно Закону, «перечни объектов культурного наследия, перечни выявленных объектов культурного наследия, границы, охранные зоны и особые режимы использования территорий объектов, установленные до принятия Республики Крым в состав Российской Федерации, сохраняют силу до их приведения в соответствие с законодательством Российской Федерации» [16, ст. 44].

2. Постановление Совета министров Республики Крым от 29 декабря 2017 года № 750 «О создании зон с особой архитектурно-планировочной организацией территории». Согласно приложению 5 Постановления [17][18] на территории, имеющей особую историко-культурную ценность в границах исторической застройки города г. Бахчисарай постановлено создать зоны с особой архитектурно-планировочной организацией территории. Использование концепции *архитектурно-планировочных зон* призвано решить вопросы самовольного строительства и нецелевого использования земельных участков.

На уровне администрации городского поселения Бахчисарай:

1. Проект постановления администрации г. Бахчисарай «Об утверждении Положения о сохранении, использовании, популяризации объектов культурного наследия (памятников истории и культуры), находящихся в собственности муниципального образования городское поселение Бахчисарай Бахчисарайского района Республики Крым, охране объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) местного (муниципального) значения, расположенных на территории муниципального образования городское поселение Бахчисарай Бахчисарайского района Республики Крым» – Положение направлено на

реализацию полномочий органов местного самоуправления г. Бахчисарай в сфере сохранения, использования, популяризации объектов культурного наследия.

2. Правила землепользования и застройки муниципального образования городское поселение Бахчисарай Бахчисарайского района Республики Крым от 25.12.2018 № 1036 (рис. 1). Эти Правила являются нормативным актом, разрабатываемым местной администрацией, и функционально очень близки к европейским и североамериканским планам зонирования.

3. Одним из наиболее распространенных и традиционных инструментов является защитное зонирование, предполагающее сохранение объектов культурного наследия в их исторической среде [14, ст. 34]. Система охранных (буферных) зон [12] поддерживается в г. Бахчисарай в целях сохранения территорий памятников (таких, как пещерный город Чуфут-Кале, исторический квартал Салачик, Бахчисарайский Ханский дворец вместе с окружающей его архитектурно-градостроительной средой) а также исторически сложившегося архитектурно-пространственного уклада г. Бахчисарай, природных территорий и традиционного характера среды Старого города.

4. До вхождения Крыма в состав Российской Федерации были описаны границы и режимы использования Ханского дворца, охранных зон дворца и некоторых памятников в г. Бахчисарай (Рис. 2 – Границы территории и зоны охраны памятника Государственного историко-культурного заповедника в г. Бахчисарай, утвержденные Приказом Министерства культуры Украины от 31.07.2012 г. № 814) [19].

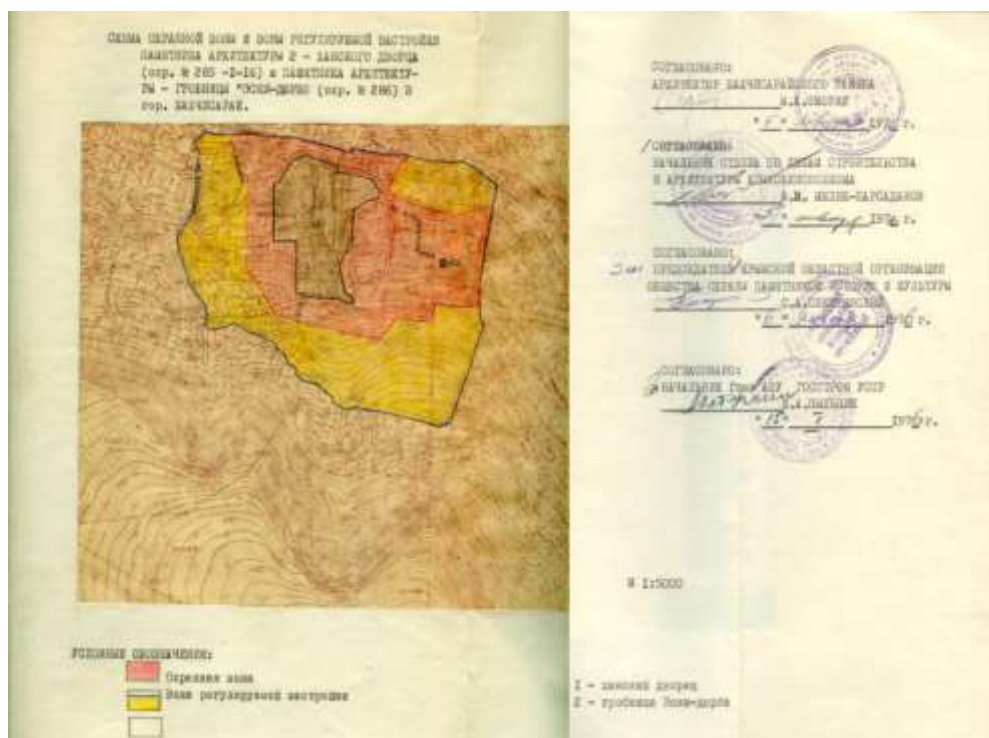
Бахчисарайский район является первым среди всех районов Крыма по количеству официально зарегистрированных памятников истории, археологии и архитектуры – более 300 [20, стр. 27; стр. 30-74] [21]. На территории г. Бахчисарай располагается более десятка объектов культурного наследия федерального значения [22] и несколько десятков объектов культурного наследия регионального значения [21]. Около десятка памятников имеют установленные охранные зоны, утвержденные решениями Крымского облисполкома от 22.05.1979 г. № 284 (рис. 3), решением Бахчисарайского райсовета от 30.05.1974 г. № 261, Постановлением Правительства АР Крым от 19.03.1996 №72 и др.

В Перечень объектов культурного наследия регионального значения включены 23 объекта г. Бахчисарай, в т. ч.: караимская кенасса (Чуфут-Кале), здание типографии и редакции газеты «Терджиман», жилой дом купца Д. Пачаджи, фонтаны «Бурма-Чешме» и «Асма-кую» и ряд других [21] (рис. 4). Вместе с тем работа по формированию перечня объектов культурного наследия в Республике Крым продолжается.



местам могут относиться объекты, «созданные человеком, или совместные творения человека и природы, в том числе места традиционного бытования народных художественных промыслов; центры исторических поселений или фрагменты градостроительной планировки и застройки;

памятные места, культурные и природные ландшафты, связанные с историей формирования народов <...> объекты археологического наследия; места совершения религиозных обрядов» и прочее [14, ст. 3].



**Рис. 3.** Схема охранной зоны и зоны регулируемой застройки в Бахчисарае, утвержденная Решением Крымского облисполкома от 22.05.1979 №284.

**Fig. 3.** The scheme of the security zone and the zone of regulated development in Bakhchisarai, approved by the Decision of the Crimean Regional Executive Committee dated 05/22/1979 No. 284.

Согласно п. 1 ст. 57 Федерального закона от 25.06.2002 № 73-ФЗ, «...в отношении достопримечательного места, представляющего собой выдающийся целостный историко-культурный и природный комплекс, нуждающийся в особом режиме содержания может быть принято решение об отнесении данного достопримечательного места к историко-культурным заповедникам» [14, п. 1 ст. 57]. Порядок организации историко-культурного заповедника в г. Бахчисарай (в зависимости от значения объекта) регулируют:

Положение, утвержденное приказом Минкультуры РФ от 23 апреля 2015 г. N 1149 [23];

Региональный акт, утвержденный постановлением Совета министров Республики Крым от 31 мая 2016 года N 235 [24];

Муниципальный акт, утвержденный Постановлением администрации Бахчисарайского района РК N779 от 28.12.2018 [25].

На территории Бахчисарайского района функционирует крупный заповедник – ГБУ РК «Бахчисарайский историко-культурный и археологический музей-заповедник» (далее

БИКАМЗ), созданный на базе Бахчисарайского дворца-музея (основан в 1917 г.). В рамках БИКАМЗ охраняемым статусом наделяется и ряд историко-архитектурных комплексов, располагающихся в границах г. Бахчисарай. В то же время, остается неразрешенным ряд вопросов правового характера. «В первую очередь, это касается определения полномочий администрации музеев-заповедников. Не сформулированы, в частности, цели и задачи, нормы и права, уровень компетенции указных лиц» [26, с. 7].

Приказом Министерства культуры Украины «Об утверждении научно-проектной документации о границах и режимах использования зон охраны памятников...» от 31.07.2012 г. № 814 утверждены зоны охраны Бахчисарайского историко-культурного заповедника, в этом же документе указаны границы охраняемой территории. В 2013-м году предпринятием «Научно-исследовательский и проектный институт «Крымпроектреставрация» подготовлен историко-архитектурный опорный план г. Бахчисарай (рис. 5), который 27.12.2013 был направлен на доработку [27]. Работа по документу не была завершена.



**Рис. 4.:** а – Здание типографии и редакции газеты «Терджиман»,

б – жилой дом купца Д. Пачаджи, в – фонтан «Бурма-Чешме», г – фонтан «Асма-кую».

**Fig. 4.:** а – The building of the printing house and the editorial office of the newspaper "Terjiman",

б – the apartment building of the merchant D. Pachaji, c – the fountain "Burma-Cheshme", g – the fountain "Asma-kuyu".

В правовом поле Российской Федерации существует еще один инструмент, призванный сохранить аутентичную среду исторических городов – концепция *исторического поселения*. В п. 1 ст. 59 Федерального закона от 25.06.2002 № 73-ФЗ перечислены следующие компоненты, составляющие предмет охраны исторического поселения: ценные градоформирующие объекты (здания и сооружения, как сохранившиеся, так и утраченные), планировочную и объемно-пространственную структуры, композицию и силуэт застройки, соотношение между различными городскими пространствами, композиционно-видовые связи (панорамы), соотношение природного и созданного человеком окружения [14, ст. 59].

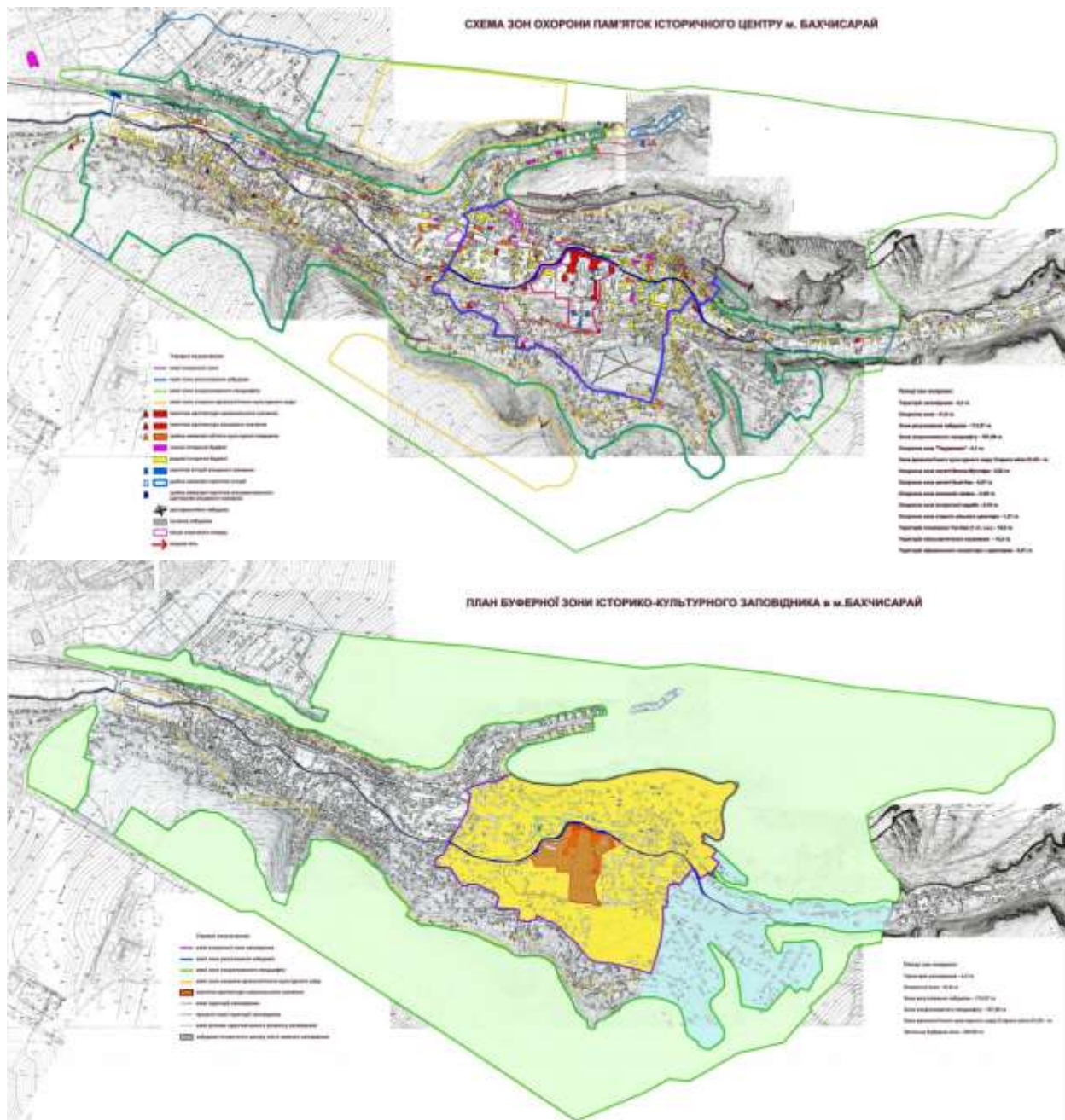
Исторический район г. Бахчисарай сохранил ценные градоформирующие сооружения, планировочную и объемно-пространственную структуры, композицию и силуэт застройки, композиционно-видовые связи (панорамы), соотношение природного и созданного человеком окружения. Ядром города является дворцовый комплекс крымских ханов – объект культурного наследия международного значения, включенный в предварительный список всемирного наследия ЮНЕСКО. Ко всему прочему, в черте г. Бахчисарай находятся и другие памятники, имеющие статус федеральных – пещерный город Чуфут-Кале и

Успенский пещерный монастырь (VI-XIX вв.), школа Зынджырлы-медресе (1500 г.), а так же комплекс дюрбе Эски-Юрта (XIV-XVII вв.). Все вышеприведенное дает основания для включения города в список исторических поселений федерального значения.

Следует отметить, что Федеральный закон закрепляет создание субъектами РФ списков исторических поселений регионального значения [14, п. 7 ст. 59]. По состоянию на 2023 год установлен порядок включения населенного пункта в перечень исторических поселений регионального значения Республики Крым, однако сам перечень исторических поселений не утвержден. Согласно Закону Республики Крым от 11.09.2014 г. № 68-ЗРК [16, ст. 44], до утверждения перечня исторических поселений, достопримечательных мест в Республике Крым сохраняются границы и действуют режимы исторических ареалов населенных мест, утвержденные на день принятия в состав РФ Республики Крым. Так, город Бахчисарай уже дважды имел статус исторического населенного места (поселения): при СССР [28][29] и в украинский период [30].

Требования к определению границ территории исторического поселения изложены в соответствующем нормативном акте, утвержденном постановлением Правительства РФ от 28 ноября 2013 г. N 1095 [31]. Осуществление деятельности в

границах исторического поселения регулируют ст. 60 N 73-ФЗ [16, ст. 60], Градостроительный кодекс РФ [12], а также законодательство субъекта Федерации.



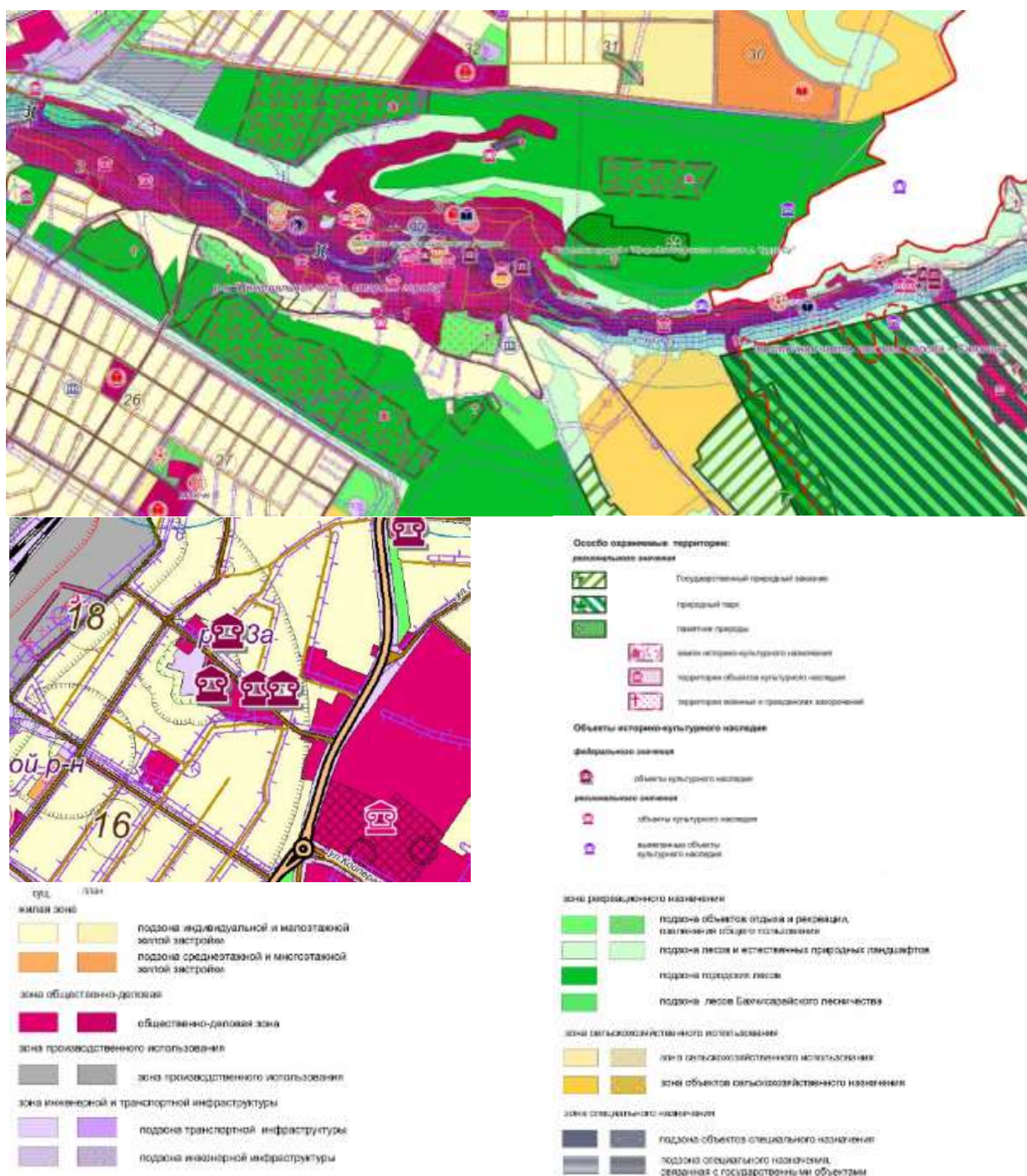
**Рис. 5.** Концепция плана организации территории государственного историко-культурного заповедника в г. Бахчисарай с определением границ и режимов использования зон охраны памятников. *Сверху* – Схема охранных зон исторического центра г. Бахчисарай; *снизу* – План буферной зоны историко-культурного заповедника в г. Бахчисарай.

**Fig. 5.** The concept of the organization plan for the territory of the state historical and cultural reserve in the city of Bakhchisarai with the definition of boundaries and modes of use of monument protection zones. Above is a diagram of the protected areas of the historical center of Bakhchisarai; below is a plan of the buffer zone of the historical and cultural reserve in Bakhchisarai.

Сохранение исторических центров поселений регулирует статья 47 Закона № 73-ФЗ, посвященная воссозданию памятников и проблеме нововдела. В ней подчеркивается, что воссоздание утраченного объекта осуществляется в исключительных случаях при особой значимости объекта и при наличии достаточных научных данных [14, ст. 47]. Помимо этого, решение о

воссоздании объекта принимается на основании заключения историко-культурной экспертизы.

В настоящее время на региональном уровне продолжается разработка подзаконных актов. Разработка муниципальной правовой базы г. Бахчисарай в сфере культурного наследия пока остается на начальной стадии.



**Рис. 6.** Карта функциональных зон муниципального образования городское поселение Бахчисарай Бахчисарайского района. Фрагмент генерального плана со старой частью города (сверху) и территорией памятников Эски-Юрта (слева).  
**Fig. 6.** Map of functional zones of the municipal formation urban settlement of Bakhchisarai of Bakhchisarai district. A fragment of the master plan with the old part of the city (top) and the territory of the Eski Yurt monuments (left).

Изучение генерального плана г. Бахчисарай (рис. 6) показывает отсутствие на карте функциональной зоны исторической застройки – Старый город г. Бахчисарай и территория комплекса Эски-Юрт указаны как планируемая общественно-деловая зона (рис. 6). В пояснительной записке к генплану зона исторической застройки упомянута. Согласно Земельному кодексу, в состав территориальных зон могут включаться зоны особо охраняемых территорий, то есть земельные участки, имеющие особое природоохранное, научное, историко-культурное, эстетическое, рекреационное,

оздоровительное и иное особо ценное значение [13, п. 12 ст. 35].

## ВЫВОДЫ

К доступным инструментам регулирования развития городской среды г. Бахчисарай относятся:

- 1) концепция градостроительных регламентов;
- 2) система защитного зонирования архитектурных памятников с буферными зонами;
- 3) статус исторического поселения;
- 4) статус достопримечательного места;
- 5) статус историко-культурного заповедника;

- 6) концепция зон с особой архитектурно-планировочной организацией территории;
- 7) приватизация исторических сооружений местного значения с утверждением охранного обязательства собственников;
- 8) включение исключительных памятников истории и культуры (комплекс Ханского дворца, средневековый город Чуфут-Кале) в список всемирного наследия ЮНЕСКО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко Элеонора Арсеновна, Лукашов А.В., Никифоров А.А. ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ФЕНОМЕНА ДОСТОПРИМЕЧАТЕЛЬНОГО МЕСТА // Имущественные отношения в РФ. 2020. №10 (229). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovye-aspekty-fenomena-dostoprimechatelnogo-mesta> (дата обращения: 29.07.2024).
2. Субботин О.С. Особенности регенерации кварталов исторической застройки часть I // Жилищное строительство. 2012. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-regeneratsii-kvartalov-istoricheskoy-zastroyki-chast-i> (дата обращения: 29.07.2024).
3. Бурмистрова Е. А. Современное законодательство об охране объектов культурного наследия народов Российской Федерации // КриминалистЪ. 2013. №1(12) URL: <http://procuror.spb.ru/k1217.html>
4. Marushina N., Nazarova A., Pasechnik I. Historical cities as an object of protection: approaches to the preservation of urbanplanning heritage in Russia, 2020 URL: [https://www.researchgate.net/publication/341159321\\_Historical\\_cities\\_as\\_an\\_object\\_of\\_protection\\_approaches\\_to\\_the\\_preservation\\_of\\_urban\\_planning\\_heritage\\_in\\_Russia](https://www.researchgate.net/publication/341159321_Historical_cities_as_an_object_of_protection_approaches_to_the_preservation_of_urban_planning_heritage_in_Russia)
5. Актуальные вопросы охраны и использования культурного наследия Крыма: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Евпатория, 30–31 мая 2019 г. / гл. ред. В. Е. Науменко. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2019. – 312 с.
6. Литвинова Ольга Геннадьевна, Романова Лариса Степановна Зарубежный опыт сохранения историко-культурного наследия // Вестник ТГАСУ. 2009. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-sohraneniya-istoriko-kulturnogo-naslediya> (дата обращения: 29.07.2024).
7. Международные акты и конвенции // Хранители наследия URL: <https://hraniteli-nasledia.com/dose/mezhdunarodnye-akty-i-konventsii/>
8. Конвенция о защите культурных ценностей в случае вооруженного конфликта от 14 мая 1954 года, Гаага. URL: <https://www.icrc.org/ru/doc/resources/documents/misc/treaties-cultural-properties-140554.htm>
9. Конвенция о мерах, направленных на запрещение и предупреждение незаконного ввоза, вывоза и передачи права собственности на культурные ценности от 14 ноября 1970 г., Париж. URL: <https://base.garant.ru/2540238/>
10. Проект декларации ЮНЕСКО, касающейся преднамеренного разрушения культурного наследия от 17 июля 2003 года, Париж. URL: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130780\\_rus](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130780_rus)
11. Принципы Валлетты по сохранению и управлению историческими городами и урбанизированными территориями, 2011. URL: [https://www.icomos.org/charters/RUSS\\_Valletta\\_principles.pdf](https://www.icomos.org/charters/RUSS_Valletta_principles.pdf)
12. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 19.12.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 03.02.2023). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/)
13. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 05.12.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2023). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/)
14. Федеральный закон от 25 июня 2002 г. N 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» (последняя редакция). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_37318/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/) (дата обращения: 14.02.2023)
15. Федеральный Закон Российской Федерации от 12.02.2015 № 9-ФЗ «Об особенностях правового регулирования отношений в области культуры и туризма в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя» (последняя редакция). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70766584/> (дата обращения: 14.02.2023)
16. Закон Республики Крым «Об объектах культурного наследия в Республике Крым» от 11.09.2014 №68-ЗПК (ред. от 12.04.2022). URL: <https://docs.cntd.ru/document/413902335>
17. Постановление Совета министров Республики Крым от 29 декабря 2017 года № 750 «О создании зон с особой архитектурно-планировочной организацией территории»
18. Постановление Совета министров Республики Крым от 30 декабря 2021 года № 901 «О создании зоны с особой архитектурно-планировочной организацией территории». URL: <https://rk.gov.ru/ru/document/show/32345>
19. Приказ Министерства культуры Украины от 31.07.2012 г. № 814 «Об утверждении схемы охранной зоны и зоны регулируемой застройки памятника архитектуры – Ханского дворца и памятника архитектуры – гробницы Эски-Дюрбе».
20. Отчёт о сборе, систематизации исходных данных для выполнения научно-исследовательской работы по подготовке документов

территориального планирования муниципального образования (1-й этап) // Подготовка схемы территориального планирования Бахчисарайского муниципального района. URL: [https://bahch.rk.gov.ru/uploads/bahch/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ\\_15.pdf](https://bahch.rk.gov.ru/uploads/bahch/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ_15.pdf);

21. Постановление Совета министров Республики Крым от 20.12.2016 № 627 «Об отнесении объектов культурного наследия к объектам культурного наследия регионального значения и выявленным объектам культурного наследия». URL: [https://archive-gkokn.rk.gov.ru/uploads/txteditor/gkokn/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phprld68R\\_1.pdf](https://archive-gkokn.rk.gov.ru/uploads/txteditor/gkokn/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phprld68R_1.pdf) (дата обращения: 14.02.2023)

22. Распоряжение Правительства РФ от 17 октября 2015 г. N 2073-р «Об отнесении объектов культурного наследия, расположенных на территориях Республики Крым и г. Севастополя, к объектам культурного наследия федерального значения»;

23. Приказ Министерства культуры Российской Федерации от 23 апреля 2015 г. N 1149 «Об утверждении положения о порядке организации историко-культурного заповедника Федерального значения». URL: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Minkultury-Rossii-ot-23.04.2015-N-1149/>

24. Постановление Совета министров Республики Крым от 31 мая 2016 года № 235 «Об утверждении Порядка организации историко-культурного заповедника регионального значения». URL: <https://rk.gov.ru/document/show/1795>

25. Постановление главы администрации Бахчисарайского района Республики Крым от 28.12.2018 № 779 «Об утверждении Порядка организации историко-культурного заповедника местного значения, определения его границы и режима содержания на территории муниципального образования – Бахчисарайский район Республики Крым» URL: <https://bahch.rk.gov.ru/document/show/8651>

26. Концепция развития ГБУ РК «Бахчисарайский историко-культурный и археологический музей-заповедник», 2018. URL: <https://handvorec.ru/wp-content/uploads/2018/02/Kontseptsiya-itog.pdf> (Дата обращения: 14.02.2023)

27. Историко-архитектурный опорный план города Бахчисарая Автономной Республики Крым. – Т.1. – Кн.1. Текстовая часть и материалы фотофиксации. – Киев, 2013. – 49 с.

28. Борисов В. Н. Первый ханский дворец на территории Эски Саладжика – древнего района современного Бахчисарая. Ч. 1-3. 2019. 108 с.

29. Приказ председателя Государственного комитета Совета Министров Украинской ССР по делам строительства от 9 августа 1968 г. No 134 «Об утверждении списка древних городов, поселков и сел Украинской ССР».

30. Постановление Кабинета Министров Украины «Об утверждении списка исторических

населенных мест Украины» от 26 июля 2001 года No 878. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2001-%D0%BF#Text>

31. Постановление Правительства РФ от 28 ноября 2013 г. №1095. URL: <https://base.garant.ru/70522362/>

## REFERENCES

1. Shevchenko Eleonora Arsenovna, Lukashov A.V., Nikiforov A.A. *Pravovye aspekty fenomena dostoprimechatelnogo mesta* [LEGAL ASPECTS OF THE PHENOMENON OF A PLACE OF INTEREST] // Property relations in the Russian Federation. 2020. No.10 (229). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovye-aspekty-fenomena-dostoprimechatelnogo-mesta> (accessed 07/29/2024). (in Russian)

2. Subbotin O.S. *Osobennosti regeneratsii kvartalov istoricheskoy zastroiki chast' I* [Features of regeneration of blocks of historical buildings part I] // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2012. No.10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-regeneratsii-kvartalov-istoricheskoy-zastroiki-chast-i> (accessed 07/29/2024). (in Russian)

3. Burmistrova E. A. *Sovremennoye zakonodatel'stvo ob okhrane ob'ektov kul'turnogo naslediya narodov Rossiyskoy Federatsii* [Modern legislation on the protection of cultural heritage objects of the peoples of the Russian Federation] // Criminalist. 2013. №1(12). Available at: <http://procuror.spb.ru/k1217.html> (in Russian)

4. Marushina N., Nazarova A., Pasechnik I. Historical cities as an object of protection: approaches to the preservation of urbanplanning heritage in Russia, 2020 Available at: [https://www.researchgate.net/publication/341159321\\_Historical\\_cities\\_as\\_an\\_object\\_of\\_protection\\_approaches\\_to\\_the\\_preservation\\_of\\_urban\\_planning\\_heritage\\_in\\_Russia](https://www.researchgate.net/publication/341159321_Historical_cities_as_an_object_of_protection_approaches_to_the_preservation_of_urban_planning_heritage_in_Russia)

5. Topical issues of protection and use of the cultural heritage of the Crimea: materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Yevpatoria, May 30-31, 2019 / Chief editor V. E. Naumenko. – Simferopol : IT "ARIAL", 2019. – 312 p. (in Russian)

6. Litvinova Olga Gennadievna, Romanova Larisa Stepanovna *Zarubezhnyy opyt sokhraneniya istoriko-kul'turnogo naslediya* [Foreign experience in preserving historical and cultural heritage] // Bulletin of the TSASU. 2009. No.1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-sokhraneniya-istoriko-kulturnogo-naslediya> (accessed 07/29/2024). (in Russian)

7. International acts and conventions // Keepers of Heritage Available at: <https://hraniteli-nasledia.com/dose/mezhdunarodnye-akty-i-konventsii/> (in Russian)

8. Convention for the Protection of Cultural Property in the Event of Armed Conflict of May 14, 1954, The Hague. Available at: <https://www.icrc.org/ru/doc/resources/documents/misc/treaties-cultural-properties-140554.htm> (in Russian)

9. Convention on Measures aimed at Prohibiting and Preventing the Illicit Import, Export and Transfer of Ownership of Cultural Property of November 14, 1970, Paris. Available at: <https://base.garant.ru/2540238/> (in Russian)
10. Draft UNESCO Declaration on the deliberate destruction of cultural heritage dated July 17, 2003, Paris. Available at: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130780\\_rus](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130780_rus) (in Russian)
11. Valletta Principles for the Conservation and Management of Historic Cities and Urbanized Territories, 2011. Available at: [https://www.icomos.org/charters/RUSS\\_Valletta\\_principles.pdf](https://www.icomos.org/charters/RUSS_Valletta_principles.pdf) (in Russian)
12. The Urban Planning Code of the Russian Federation dated 12/29/2004 No. 190-FZ (as amended on 12/19/2022) (with amendments and additions, intro. effective from 02/03/2023). URL.: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/) (in Russian)
13. The Land Code of the Russian Federation No. 136-FZ dated 10/25/2001 (as amended on 12/05/2022) (with amendments and additions, intro. effective from 01.01.2023). Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (in Russian)
14. Federal Law No. 73-FZ of June 25, 2002 "On Objects of Cultural Heritage (historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation" (latest edition). URL.: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_37318/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/) (date of access: 02/14/2023) (in Russian)
15. Federal Law of the Russian Federation No. 9-FZ dated 12.02.2015 "On the Specifics of Legal Regulation of Relations in the field of culture and Tourism in connection with the Admission of the Republic of Crimea to the Russian Federation and the formation of new Subjects within the Russian Federation – the Republic of Crimea and the Federal city of Sevastopol" (latest edition). URL.: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70766584/> (date of request: 02/14/2023) (in Russian)
16. The Law of the Republic of Crimea "On Cultural Heritage Sites in the Republic of Crimea" dated 11.09.2014 No. 68-ZRK (as amended on 04/12/2022). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/413902335> (in Russian)
17. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea dated December 29, 2017 No. 750 "On the creation of zones with a special architectural and planning organization of the territory" (in Russian)
18. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea dated December 30, 2021 No. 901 "On the creation of a zone with a special architectural and planning organization of the territory". Available at: <https://rk.gov.ru/ru/document/show/32345> (in Russian)
19. Order of the Ministry of Culture of Ukraine dated 07/31/2012 No. 814 "On approval of the scheme of the security zone and the zone of regulated development of the architectural monument – the Khan's Palace and the architectural monument – the tomb of Eski-Durbe". (in Russian)
20. Report on the collection, systematization of initial data for the implementation of research work on the preparation of documents for territorial planning of a municipal formation (1st stage) // Preparation of a territorial planning scheme of the Bakhchisarai municipal district. Available at: [https://bahch.rk.gov.ru/uploads/bahch/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ\\_15.pdf](https://bahch.rk.gov.ru/uploads/bahch/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ_15.pdf); (in Russian)
21. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea dated 12/20/2016 No. 627 "On the assignment of cultural heritage sites to cultural heritage sites of regional significance and identified cultural heritage sites". Available at: [https://archive-gkokn.rk.gov.ru/uploads/txteditor/gkokn/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ\\_15.pdf](https://archive-gkokn.rk.gov.ru/uploads/txteditor/gkokn/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php7LlnXJ_15.pdf) (date of appeal: 02/14/2023) (in Russian)
22. Decree of the Government of the Russian Federation dated October 17, 2015 No. 2073-р "On the assignment of cultural heritage sites located in the territories of the Republic of Crimea and Sevastopol to cultural heritage sites of federal significance"; (in Russian)
23. Order of the Ministry of Culture of the Russian Federation No. 1149 dated April 23, 2015 "On approval of the Regulations on the procedure for organizing a historical and cultural reserve of Federal Significance". Available at: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Minkultury-Rossii-ot-23.04.2015-N-1149/> (in Russian)
24. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea dated May 31, 2016 No. 235 "On Approval of the Procedure for Organizing a historical and cultural reserve of regional significance". Available at: <https://rk.gov.ru/document/show/1795> (in Russian)
25. Resolution of the head of the administration of the Bakhchisarai district of the Republic of Crimea dated 12/28/2018 No. 779 "On approval of the Procedure for organizing a historical and cultural reserve of local importance, determining its boundaries and maintenance regime on the territory of the municipality - Bakhchisarai district of the Republic of Crimea" Available at: <https://bahch.rk.gov.ru/ru/document/show/8651> (in Russian)
26. The concept of development of the State Budgetary Institution of the Republic of Kazakhstan "Bakhchisarai Historical, Cultural and Archaeological Museum-Reserve", 2018. Available at: <https://handvorec.ru/wp-content/uploads/2018/02/Kontseptsiya-itog.pdf> (accessed 02/14/2023) (in Russian)
27. Historical and architectural reference plan of the city of Bakhchisarai of the Autonomous Republic of Crimea. – Vol. 1. – Book.1. The text part and the materials of the photo fixation. – Kiev, 2013. – 49 p. (in Russian)
28. Borisov V. N. The first Khan's palace on the territory of Eski Saladzhiik – the ancient district of modern Bakhchisarai. Ch. 1-3. 2019. 108 p. (in Russian)
29. Order of the Chairman of the State Committee of the Council of Ministers of the Ukrainian SSR for

Construction dated August 9, 1968 No. 134 "On approval of the list of ancient cities, towns and villages of the Ukrainian USSR". (in Russian)

30. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the list of historical inhabited places of Ukraine" dated July 26, 2001 No. 878.

Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2001-%D0%BF#Text> (in Russian)

31. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1095 dated November 28, 2013. Available at: <https://base.garant.ru/70522362/> (in Russian)

## INTERNATIONAL LAW AND LEGISLATION OF THE RUSSIAN FEDERATION AND THE REPUBLIC OF CRIMEA IN THE FIELD OF PROTECTION AND PRESERVATION OF THE HISTORICAL URBAN ENVIRONMENT OF THE CITY OF BAKHCHISARAI

Nagaeva Z.S., Alchikov R. L., Kurtbedinova M. E.

ANO Center for Scientific and Innovative Development of Architecture and Art,  
295023, Republic of Crimea, Simferopol, Rodnikovy per., 13  
E-mail: zarema.nagaeva@gmail.com

**Abstract.** This article examines the issues of international law and legislation of the Russian Federation and the Republic of Crimea in the context of the protection and preservation of the historical urban environment of Bakhchisarai. The authors analyzed international treaties, regulations at the level of the Russian Federation, the Republic of Crimea and the municipality of Bakhchisarai concerning the protection of cultural heritage, and considered their application in practice in this context.

**Subject of research:** legislation in the field of protection and preservation of the historical urban environment of Bakhchisarai.

**Materials and methods.** The following methods were used in the research process: analysis of scientific, literary, practical sources, archival search.

**Results.** It is established that the available tools for regulating the development of the urban environment of Bakhchisarai include: the concept of urban planning regulations; the system of protective zoning of architectural monuments with buffer zones; the status of a historical settlement; the status of a landmark; the status of a historical and cultural reserve; the concept of zones with a special architectural and planning organization of the territory; privatization of historical structures of local importance with the approval of a protective obligation owners; The inclusion of exceptional historical and cultural monuments (the Khan's Palace complex, the medieval town of Chufut-Kale) in the UNESCO World Heritage List.

**Conclusions.** The regulatory framework of the Russian Federation contains a number of provisions and methods by which it is possible to ensure the protection of the cultural heritage of Bakhchisarai. The Russian Federation has ratified the relevant UN Conventions in the field of cultural heritage protection, compliance with which will contribute to the development of the historical urban environment of Bakhchisarai. The formation of an integrated approach to the preservation and development of the historical urban environment will preserve the unique cultural heritage and increase the tourist attractiveness and socio-economic stability of the region.

**Key words:** Bakhchisarai town, urban planning structure, legislation of the Russian Federation, protection of cultural heritage, architectural heritage, historical settlements

## Раздел 2. Строительство

УДК 624.046.2

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕННОГО ЗДАНИЯ

Перминов Д.А.

Институт «Академия строительства и Архитектуры», ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
адрес: г. Симферополь, ул. Киевская, 181,  
e-mail: dmitriy714@mail.ru

**Аннотация:** В статье описывается информационная модель каменного здания в стадии эксплуатации, приводятся результаты расчетного анализа несущей способности элементов каменного здания.

**Предмет исследования:** Несущая способность элементов каменного здания.

**Материалы и методы:** Создание и расчет пространственной модели каменного здания выполнен с помощью ПК «ЛИРА-САПР».

**Результаты:** В результате расчета в упругой стадии были получены усилия, напряжения и армирование в несущих элементах каменного здания.

**Выводы:** Выполнено сопоставление фактических параметров несущей способности элементов каменного здания, полученных по данным технического обследования, с результатами расчетного анализа.

**Ключевые слова:** техническое состояние, дефекты, несущая способность, расчетная модель, расчетный анализ, каменное здание, стадия эксплуатации.

### ВВЕДЕНИЕ

Весной 2024 г. при демонтаже отделочных слоев для выполнения капитального ремонта каменного здания – индивидуального жилого трехэтажного дома, расположенного в г. Симферополь, – были вскрыты многочисленные дефекты несущих и ограждающих конструкций. С целью оценки технического состояния строительных конструкций и грунтового основания, определения ресурса фактической безопасности конструкций, установления соответствия несущих конструкций нормативным требованиям специализированными организациями были выполнены техническое обследование и инженерно-геологические изыскания. Также был выполнен анализ соответствия фактических конструктивных решений принятым в рабочем проекте.

Анализ полученных данных позволил определить основные причины появления выявленных дефектов:

- специфические инженерно-геологические условия: по данным акта освидетельствования грунтов основания от 2006 г. грунты основания фундаментов обладают просадочными свойствами.

- изменение инженерно-геологических условий: по данным изысканий 2024 г. установлено значительное увеличение влажности грунтового основания;

- несоответствие реализованных конструктивных решений принятым в рабочем проекте;

- применение материалов низкого качества;

- нарушением технологии выполнения работ.

Все перечисленные факторы совместно влияли, продолжают влиять на снижение несущей способности элементов и здания в целом.



Рис. 1. Общий вид здания  
Fig. 2. General view of the building

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

С целью соблюдения требований СП 255.1325800.2016 «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», в соответствии с СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» было принято решение о выполнении расчетного анализа несущей способности элементов каменного здания с применением информационной модели (в стадии эксплуатации).

Руководствуясь опытом [4, 6] выполнен сбор и анализ исходных данных.

Исходные данные получены по данным заключения по результатам технического обследования несущих конструкций жилого дома и отчета об инженерно-геологических изысканиях (2024 г).

Здание в плане имеет сложную форму. Общие габариты – 13,3 м × 16,6 м, высота (до самого высокого конька) – 11,9 м. Под частью здания

устроен подвал. Высота помещения подвала 2,3 м, помещений первого этажа – 3,3 м, второго этажа – 2,9 м, третьего этажа – 2,7 м. Конструктивная схема здания – бескаркасная. Конструктивное решение (в соответствии с заключением по результатам технического обследования несущих конструкций жилого дома, рабочим проектом): фундамент – ленточный монолитный железобетонный, шириной подошвы 800 мм – 1000 мм, толщиной – 300 мм, из бетона класса В15; стены подвала – из бетонных блоков для стен подвалов (ФБС), толщиной 400 мм. Класс бетона ФБС – В7,5 (ГОСТ 13579-2018), раствор – сложный, марки М50; стены – из блоков бетонных ячеистых неавтоклавного твердения из бетона класса В2, плотностью D900, толщиной 400 мм; перекрытие – сборные железобетонные многопустотные панели перекрытия, толщиной 220 мм по серии 1.141-1.63 (несейсмический вариант исполнения); пояса – монолитные железобетонные, сечением 400 мм × 150 мм, бетон класса В15; ригели – монолитные железобетонные, сечением 400 мм × 400 мм, 400 мм × 1000 мм бетон класса В15; колонны – монолитные железобетонные, сечением 400 мм × 400 мм, бетон класса В15; лестница – монолитная железобетонная, толщиной 200 мм, бетон класса В20; несущие элементы крыши – деревянные стропила, сечением 50 мм × 165 мм с шагом 800 мм; кровельное покрытие – металлическая черепица.

В соответствии с актом освидетельствования грунтов основания грунтовым основанием фундаментов является глина буровато-, рыжевато- и желтовато-коричневая, местами пестроцветная зеленовато-коричневая, легкая пылеватая, полутвердая, ненабухающая, просадочная, с карбонатными новообразованиями, с ходами землероев заполненных почвой, с линзами до 5-10 см глины гравелистой. Мощность просадочной толщи 1,0-1,8 м. По лабораторным данным, начальное просадочное давление изменяется от 0,97 кгс/см<sup>2</sup> до 2,20 кгс/см<sup>2</sup>, величина относительной просадочности в интервале нагрузок P=1-2 кгс/см<sup>2</sup> составила 0,007. Согласно ГОСТ 25100-2020 глины ИГЭ-1 слабопросадочные, территория их

распространения относится к I типу грунтовых условий по просадочности [12].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создание и расчет трехмерной компьютерной модели здания выполнен с помощью программного комплекса «ЛИРА-САПР», который является многофункциональным программным комплексом для расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения [1, 2, 5].

Теоретической основой примененного программного комплекса является метод конечных элементов (далее МКЭ), реализованный в форме перемещений. Выбор именно этой формы обусловлен простотой алгоритмизации и физической интерпретации, возможностью создания единых методов построения матриц жесткости и векторов нагрузок для разных типов конечных элементов, возможностью моделирования сложной геометрии и учета любых граничных условий.

Для выполнения расчетов была создана пространственная модель здания (рис. 2). В качестве используемых конечных элементов для построения компьютерной модели использовались следующие конечные элементы: тип 44 – универсальный четырехугольный конечный элемент оболочки и тип 10 – универсальный пространственный стержневой конечный элемент. Совместная работа фундамента и грунта основания смоделирована с использованием коэффициентов постели, полученных по модели грунта. Характеристики грунтов приняты в соответствии с данными рабочего проекта и актом освидетельствования грунтов котлована. Линейные перемещения в вертикальной плоскости ограничены упругим основанием, в горизонтальной при помощи одноузловых конечных элементов КЭ56. Расчет здания выполнен на основное и особое сочетание нагрузок.

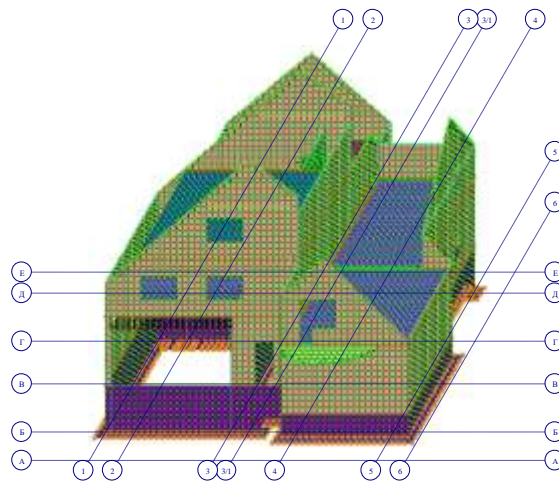


Рис. 2. Конечно-элементная модель  
Fig. 2. Finite-element model

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

### Результаты расчета фундамента

Напряжения под подошвой фундамента не превышают расчетного сопротивления грунта  $R=163\text{кПа} < R_0=285\text{кПа}$  (рис. 3).

Максимальная осадка фундаментов составляет  $s=9\text{мм}$ , что не превышает предельной деформации основания  $s_0=150\text{мм}$  в соответствии с прил. Д табл. Д.1.[12](рис. 4).

Требуемое армирование ленточного фундамента, определенное расчетом: нижняя сетка:  $\varnothing 10\text{A}400$  с шагом 200 мм ( $A=3,93\text{см}^2$ ) в двух

направлениях. Дополнительное армирование в зонах пересечений:  $\varnothing 10\text{A}400$  с шагом 200 мм ( $A=3,93\text{см}^2$ ).

Фактическое армирование ленточного фундамента, определенное вскрытием фундамента со стороны подвала: нижняя сетка:  $\varnothing 10\text{A}400$  (А-III) с шагом 200 мм ( $A=3,93\text{см}^2$ ) в продольном направлении и  $\varnothing 10\text{A}400$  (А-I) с шагом 300мм ( $A=2,36\text{см}^2$ ) в поперечном направлении.

Требуемое армирование, полученное по результатам расчета, превышает фактическое.

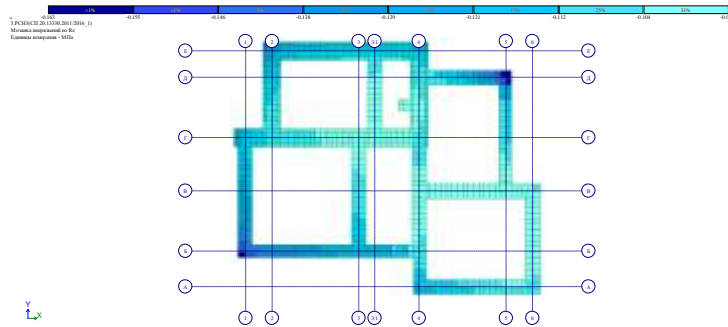


Рис. 3. Напряжения под подошвой фундамента  
Fig. 3. Stresses under the base of the foundation

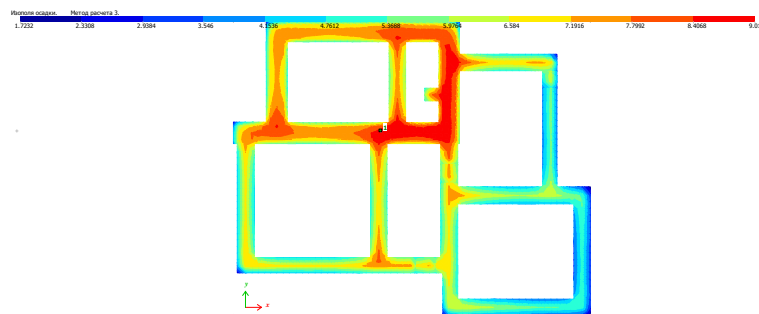


Рис. 4. Осадка фундамента  
Fig. 4. Foundation settlement

### Результаты расчета стен по 1 (напряжения) и 2 (перемещения, деформации) группе предельных состояний

Результаты расчета по первой группе предельных состояний

В стенах подвала расчетом определено следующее распределение напряжений (рис. 5):

- максимальные сжимающие напряжения ( $N_y$ ) возникают в местах пересечения стен по осям «2» и «Е», «1» и «Г» и составляют 0,493 МПа.
- максимальные касательные напряжения ( $\tau_{xy}$ ) по неперевязанному сечению составляют 0,299 МПа, возникают в стене по оси «В» – в месте расположения ступеней (по проекту) между осями «4» и «5» по всей высоте сечения. При основном сочетании нагрузок максимальные сжимающие

напряжения ( $N_y$ ) возникают также в местах пересечения стен по осям «2» и «Е», «1» и «Г» и составляют 0,462 МПа.

- касательные напряжения ( $\tau_{xy}$ ) по неперевязанному сечению в месте пересечения осей «3/1» и «Б», там же был выполнен шурф, составляют 0,178 МПа. При основном сочетании максимальные касательные напряжения ( $\tau_{xy}$ ) по неперевязанному сечению возникают также в стене по оси «В» (в месте расположения ступеней (по проекту) между осями «4» и «5» по всей высоте сечения и составляют 0,291 МПа.
- максимальные главные растягивающие напряжения ( $N1$ ) возникают в уровне низа стены, в месте расположения ступеней (по проекту), по оси

«4» на пересечении осей «В» и «4» и составляют 0,4 МПа.

• главные растягивающие напряжения ( $N_1$ ) в месте пересечения осей «3/1» и «Б», там же был выполнен шурф, составляют 0,159 МПа.

В результате анализа мозаик напряжений при особом сочетании нагрузок определены максимальные значения напряжений и выполнено их сравнение с нормируемыми значениями расчетных сопротивлений кладки (СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции»):

$$N_y = 0,493 \text{ МПа} < R = 2,97 \text{ МПа},$$

$$N_y = 0,493 \text{ МПа} < R_{sq} = 0,65 \text{ МПа}$$

(по перевязанному сечению),

$$\tau_{xy} = 0,299 \text{ МПа} > R_{sq} = 0,16 \text{ МПа}$$

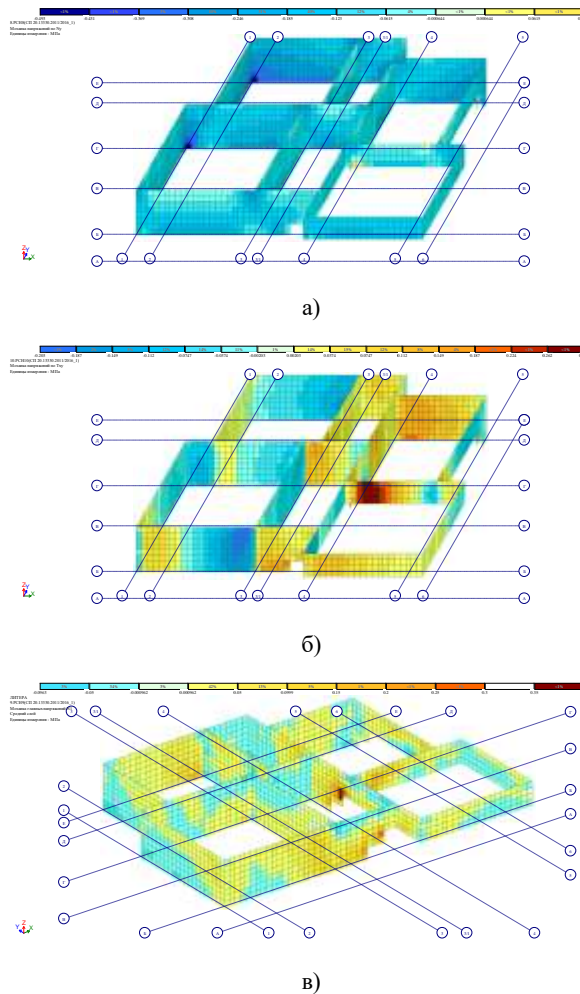
(по перевязанному сечению),

$$N_1 = 0,4 \text{ МПа} > R_{tw} = 0,12 \text{ МПа}$$

(по перевязанному сечению).

Сравнение показало, что возникающие напряжения в стенах подвала превышают предельные значения.

При основном сочетании максимальные значения напряжений также превышают предельные значения.



**Рис. 5.** Напряжения в стенах подвала при особом сочетании:

а) мозаика напряжений  $N_y$ , б) мозаика напряжений  $\tau_{xy}$ ; в) мозаика напряжений  $N_1$

**Fig. 5.** Stresses in walls with a special combination:

a) mosaic of stresses  $N_y$ , b) stress mosaic  $\tau_{xy}$ ; c) stress mosaic  $N_1$

В месте расположения шурфа (на пересечении осей «3/1» и «Б») была обнаружена сквозная вертикальная трещина, от подошвы фундамента и по всей высоте стены подвала, шириной раскрытия ... По расчету в данной зоне возникают напряжения, превышающие предельные в 1,8 раза.

При расчете кладки с помощью модуля «Кирпич» установлено, что в местах пересечения

всех стен и ступеней не обеспечена несущая способность кладки.

В стенах первого и второго этажей, фронтонах (далее – стенах) расчетом определено следующее распределение напряжений в стенах (рис. 6):

• максимальные сжимающие напряжения ( $N_y$ ) возникают по оси «Б» на втором этаже по граням оконных проемов и составляют 0,39 МПа. При основном сочетании нагрузок максимальные

сжимающие напряжения ( $N_y$ ) возникают также по оси «Б» на втором этаже по граням оконных проемов и составляют 0,39 МПа.

- максимальные касательные напряжения ( $\tau_{xy}$ ) по неперевязанному сечению составляют 0,121 МПа, возникающие по оси «Б» на втором этаже по граням оконных проемов и подоконном блоке, а также по оси «4» на первом этаже в верхней части стены. При основном сочетании максимальные касательные напряжения ( $\tau_{xy}$ ) по неперевязанному сечению составляют 0,092 МПа и возникают также по оси «Б» на втором этаже по граням оконных проемов и подоконном блоке, а также по оси «4» на первом этаже в верхней части стены.

- максимальные главные растягивающие напряжения ( $N_I$ ) возникают по оси «Г» по фронтоны и составляют 0,111 МПа;

- максимальные вертикальные растягивающие напряжения возникают в стенах, опирающихся на ригель над гаражом. Данные стены – «висячие», работают как балка, характеризуются сложным распределением напряжений.

В результате анализа мозаик напряжений при особом сочетании нагрузок определены максимальные значения напряжений и выполнено их сравнение с нормируемыми значениями расчетных сопротивлений кладки (СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции»):

$$N_y = 0,39 \text{ МПа} < R = 0,4725 \text{ МПа} ,$$

$$N_y = 0,39 \text{ МПа} > R_{sq} = 0,1 \text{ МПа}$$

(по перевязанному сечению),

$$\tau_{xy} = 0,121 \text{ МПа} > R_{sq} = 0,1 \text{ МПа}$$

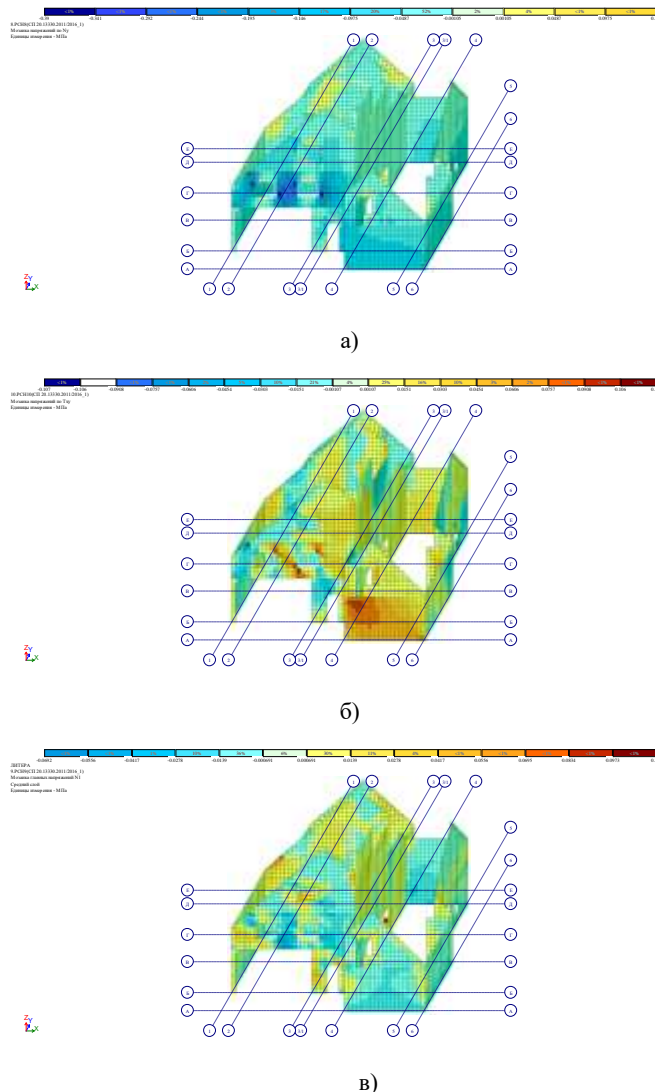
(по неперевязанному сечению),

$$N_I = 0,111 \text{ МПа} > R_{tw} = 0,08 \text{ МПа}$$

(по неперевязанному сечению).

Сравнение показало, что возникающие напряжения в стенах первого и второго этажей, фронтонах превышают предельные значения.

При основном сочетании максимальные значения напряжений не превышают предельные значения.



**Рис. 6.** Напряжения в стенах при особом сочетании:  
 а) мозаика напряжений  $N_y$ ; б) мозаика напряжений  $\tau_{xy}$ ; в) мозаика напряжений  $N_I$   
**Fig. 6.** Stresses in walls with a special combination:  
 a) mosaic of stresses  $N_y$ ; b) stress mosaic  $\tau_{xy}$ ; c) stress mosaic  $N_I$

При расчете кладки с помощью модуля «Кирпич» установлено, что в местах пересечения всех стен, фронтонах не обеспечена несущая способность кладки.

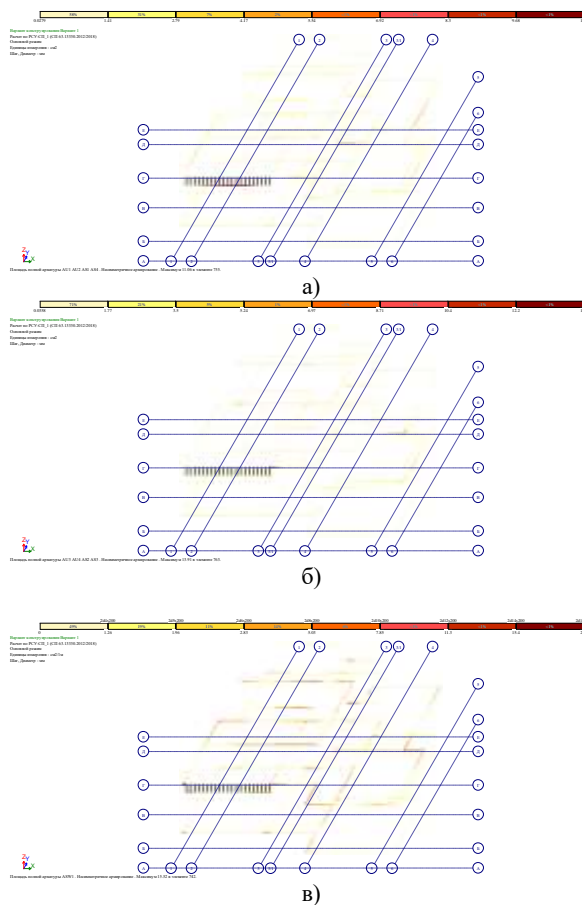
Максимальные горизонтальные перемещения стен (в т.ч. фронтонов) от основного сочетания нагрузок (с учетом ветровой нагрузки) вдоль оси X составляют 0,59 мм, вдоль оси Y – 1,2 мм, и не превышают предельно допустимых  $f=h/700=3300/500=6,6$  мм (в соответствии с табл. Д.4 [11]).

Горизонтальные перемещения (фронтонов) от особого сочетания нагрузок вдоль оси X составляют 17,7 мм, вдоль оси Y – 12,5 мм.

**Результаты расчета железобетонных конструкций**

*Армирование ригелей, определенное расчетом (рис. 7):* продольная нижняя арматура: 3Ø14A400 ( $A=3,62$  см<sup>2</sup>); продольная верхняя арматура: 3Ø14A400 ( $A=4,62$  см<sup>2</sup>); поперечная арматура: Ø8A240 с шагом 200 мм; дополнительное армирование на опорах и в пролетах: продольная арматура 2Ø16A400 ( $A=4,02$  см<sup>2</sup>).

*Армирование ригеля 400 мм x 1000 мм (над проемом гаража), определенное расчетом (рис. 7):* продольная нижняя арматура 4Ø20A400 ( $A=12,57$  см<sup>2</sup>); продольная верхняя арматура 4Ø16A400 ( $A=8,04$  см<sup>2</sup>); поперечная арматура Ø8A240 с шагом 200мм.



**Рис. 7.** Схема армирования ригеля

a) – нижнее армирование; б) – верхнее армирование; в) – поперечное армирование в вертикальном направлении

**Fig. 7.** Crossbar reinforcement diagram

a) – lower reinforcement; b) – upper reinforcement; c) – transverse reinforcement in the vertical direction

*Армирование колонн, определенное расчетом:* продольная арматура 4Ø14A400C ( $A=6,16$  см<sup>2</sup>); поперечная арматура Ø6A240 с шагом 200 мм; дополнительное армирование в зонах пересечения с ригелями: продольная арматура 4Ø14A400 ( $A=6,16$  см<sup>2</sup>).

Армирование, полученное по результатам расчета, не превышает указанное в техническом заключении – 4Ø14A400 (A-III) ( $A=6,16$  см<sup>2</sup>).

**ВЫВОДЫ**

**Выводы по результатам технического обследования и расчетного анализа несущей способности элементов каменного здания:**

1. Напряжения под подошвой фундамента **превышают** расчетного сопротивления грунта. Армирование ленточного фундамента, в т.ч. в зонах пересечений фундамента, определенное расчетом,

**превышает** фактическое, установленное в результате вскрытия фундаментов. При расчете кладки из ФБС (стен подвала и фундаментов) с учетом фактических характеристик, приведенных в заключении по результатам технического обследования, в зонах пересечений всех стен и ступеней **не обеспечена** несущая способность кладки. –

2. При визуальном осмотре стен подвала были обнаружены **вертикальные трещины** в подвале в стенах по осям «2», «Г» и **горизонтальная трещина** по оси «Е» между осями «3/1» и «4». **Наклонная трещина** обнаружена на пересечении стен по осям «5» и «Д», в зоне ступеней фундамента. На пересечении осей «3/1» и «Б» **сквозная вертикальная трещина**: от подошвы фундамента и по всей высоте стены подвала. По расчету в этой зоне возникают напряжения **превышающие** предельные. На стенах фундамента с наружной стороны **отсутствует** гидроизоляция. Обнаружены следы **коррозии** бетона и арматуры.

3. При визуальном осмотре стен первого и второго этажа, фронтонов обнаружены **многочисленные** сквозные и поверхностные **трещины** в кладке, за исключением поясов и ригелей, которые пересекают все ряды кладки по высоте здания, начиная от верха обреза фундамента и до верха фронтона. Данные трещины, в основном, вертикальные и расположены в зонах пересечений продольных и поперечных стен. Кроме этого, обнаружены мелкие **трещины**, пересекающие 3-4 ряда кладки **и расположенные** с шагом 800 – 1000 мм по длине стены. Расчетом определено, при особом сочетании нагрузок напряжения в кладке, кроме вертикальных сжимающих, **превышают** предельно допустимые. При основном сочетании нагрузок касательные напряжения **достигают** предельных значений. Максимальные напряжения возникают в зоне оконных проемов на втором этаже по оси «Б». Данная стена является «висячей» и работает как балка стенка. При расчете кладки с учетом фактических характеристик, приведенных в заключении по результатам технического обследования, в местах пересечения всех стен, фронтонах установлено, что несущая способность кладки **не обеспечена**.

4. Армирование колонн, ригелей, поясов, определенное расчетом, **не превышает** фактического, указанного в заключении по результатам технического обследования и в рабочем проекте.

5. Результаты технического обследования несущих конструкций и расчетного анализа несущей способности элементов каменного здания являются обоснованием необходимости проведения мероприятий по усилению или замене элементов каменного здания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабаш М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов

строительства: Монография. – К.: Изд-во «Сталь», 2014.–301 с.

2. Люблинский В. А. Информационная поддержка жизненного цикла несущей системы многоэтажного здания / В. А. Люблинский, Ю. В. Белокопытова // Строительство: материалы, конструкции, технологии: материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2003. – С. 9 - 11.

3. Люблинский В. А. Информационные системы в строительстве: учеб. пособие для вузов / В. А. Люблинский. – Братск: «БрГУ», 2005. – 88 с.

4. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / Алексей Руфович Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

5. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 392 с.: ил.

6. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. – 344 с.

7. Лира 9.4. Примеры расчета и проектирования: Учебное пособие / Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Гераймович Ю.Д., Куценко А.Н. Киев: Факт, 2008. – 280 с.

8. Гузненков В. Н. Компьютерное моделирование как основа геометро-графической подготовки в техническом университете / Гузненков В. Н., Журбенко П. А. // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов АСА ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского». – Симферополь, 2016. – Вып. 4. – С.64–65.

9. Морозова Е. В. Перспективные направления реконструкции зданий средней этажности с обеспечением заданного уровня сейсмостойкости / Морозова Е. В., Морозов В. В. // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов АСА ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского». – Симферополь, 2016. – Вып. 4. – С.79–86.

10. Гучкин И. С. Техническая эксплуатация и реконструкция зданий: учебное пособие для вузов / Ассоциация строительных вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 295 с.

11. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* : СП 20.13330.2016 (с Изменениями №1, 2, 3, 4). – Введ. 2017-06-04. – М. : ФГБУ «РСТ», 2022. – 80 с. – (Свод правил).

12. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* : СП 22.13330.2016. – Введен 2017-07-01. – М. : 2016. – 161 с. – (Свод правил).

## REFERENCES

1. Barabash M. S. Computer modeling of life cycle processes of construction objects: Monograph. – K.: Publishing «Steel», 2014. – 301 p.

2. Lyublinsky V. A. Information support for the life cycle of the load-bearing system of a multi-story building / V. A. Lyublinsky, Yu. V. Belokopytova // Construction: materials, structures, technologies:

materials of the interregional scientific and technical conference. – Bratsk: GOUVPO “BrSTU”, 2003. – P. 9 - 11.

3. Lyublinsky V. A. Information systems in construction: textbook. manual for universities / V. A. Lyublinsky. – Bratsk: “BrGU”, 2005. – 88 p.

4. Rzhantsyn A. R. Theory of calculation of building structures for reliability / Alexey Ruzhantsyn. – M.: Stroyizdat, 1978. – 239 p.

5. Talapov V.V. BIM Basics: An Introduction to Building Information Modeling. – M.: DMK Press, 2011. – 392 p.: ill.

6. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Komputerni modelirovaniye [Computer models of structures]. K.: Fakt, 2005. 344 p.

7. LIRA 9.4. Primery raschetov i projektirovaniya: Uchebnoe posobie [Examples of calculation and design: Tutorial] / Bogovis V.E., Genzerskiy U.V., Geraimovich U.D., Kucenko A.N. Kiev: Fakt, 2008. 280 p.

8. Guzenkov V.N., Gurbenko P.A. Computer modeling as the basis of geometric-graphic training at a

technical university // Construction and industrial safety. Simferopol, 2016. Vol. 4. pp.64–65.

9. Morozova E. V. Prospective directions for the reconstruction of mid-rise buildings with provision of a given level of seismic resistance / Morozova E. V., Morozov V. V. // Construction and technogenic safety. Sat. scientific works of ASA FSAOU VO "KFU im. V.I. Vernadsky". – Simferopol, 2016. – Issue. 4. – P.79–86.

10. Guchkin I. S. Technical operation and reconstruction of buildings: a textbook for universities / Association of Construction Universities. - 2nd ed., revised. and additional – M.: Publishing house ASV, 2013. – 295 p.

11. Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85\*: SP 20.13330.2016 (with Amendments No. 1, 2, 3, 4). – Enter. 2017-06-04. – M.: FSBI “RST”, 2022. – 80 p. – (Code of rules).

12. Foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83\*: SP 22.13330.2016. – Introduced 2017-07-01. – M.: 2016. – 161 p. – (Code of rules).

## CALCULATION ANALYSIS OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STONE BUILDING ELEMENTS

Perminov D.A.

Academy of Construction and Architecture, V.I. Vernadsky Crimean Federal University,  
Address: Simferopol, Kievskaya str., 181,  
e-mail: dmitriy714@mail.ru

**Abstract:** The article describes an information model of a stone building in operation and provides the results of a calculation analysis of the bearing capacity of the elements of a stone building.

**Subject:** Load-bearing capacity of stone building elements.

**Materials and methods:** The creation and calculation of the spatial model of a stone building was carried out using the PC LIRA-SAPR.

**Results:** As a result of the calculation in the elastic stage, the forces, stresses and reinforcement in the load-bearing elements of the stone building were obtained.

**Conclusions:** A comparison was made of the actual parameters of the bearing capacity of the elements of a stone building, obtained from the technical survey data, with the results of the calculation analysis.

**Key words:** technical condition, defects, load-bearing capacity, calculation model, calculation analysis, stone building, stage of operation.

УДК 692

## УЗЛОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СТАЛЬНЫХ МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЯХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРЕСЕЛЕНИЯ ИЗ АВАРИЙНОГО И ВЕТХОГО ЖИЛЬЯ

Царёва О.С., Козодаева В.С., Андреев В.М., Свириденко Д.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
e-mail: valeriii.kozodoy@mail.ru

**Аннотация:** В России на сегодняшний день стоит вопрос переселения из старого жилищного фонда, который не удовлетворяет стандартам благоприятной жилой среды, и признан аварийным или ветхим. Доля такого жилья с каждым годом лишь увеличивается, поэтому сокращение таких построек выступает в качестве одной из наиболее важных задач современной жилищной политики.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является узловое соединение металлических модульных конструкций, обеспечивающее пространственную жёсткость и соответствие требованиям нормативов по динамической комфортности. В условиях ускоренного строительства и необходимости переселения граждан из аварийного жилья, модульные здания становятся одним из наиболее перспективных направлений. Однако конструкции на основе металлического каркаса с податливыми соединениями часто не соответствуют нормативам по вибрационному комфорту, что требует разработки новых технических решений.

**Материалы и методы.** Разработанное соединение состоит из двух соединительных пластин толщиной 40 мм, привариваемых к колоннам, с последующим болтовым креплением. Для оценки эффективности узла были построены три варианта конечно-элементных моделей: пластинчатая модель с болтами и сваркой, упрощённая пластинчатая модель без деталей соединения и стержневая модель с использованием абсолютно жёстких тел (АЖТ). Все модели были рассчитаны в ЛИРА-САПР с применением трёх видов нагрузок: фронтальный и боковой ветер, а также нагрузка у лестничной шахты.

**Результаты.** Расчёты показали, что при использовании упрощённой модели точность остаётся приемлемой для глобальной оценки несущей способности. Проверка смоделированного 11-этажного здания подтвердила прохождение норм по динамической комфортности: ускорение на последнем этаже составило 0,08 м/с<sup>2</sup>.

**Выводы.** Предложенное узловое соединение обеспечивает необходимую жёсткость без применения железобетонного ядра, что упрощает строительство модульных зданий и сокращает сроки их возведения, сохраняя соответствие действующим нормативам. Дополнительно, универсальность конструкции позволяет адаптировать ее под различные архитектурные и инженерные решения, обеспечивая гибкость проектирования в условиях массового жилищного строительства.

**Ключевые слова:** аварийное жилье, модульные конструкции, металлический каркас, узловые соединения, модульное строительство, префабрикация.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данного исследования является разработка и проверка узлового соединения металлических контейнеров, позволяющих пройти нормы динамической комфортности.

Поставлены следующие задачи:

1. Описать разработанное узловое соединение
2. Разработать наиболее оптимальный вариант реализации узла в расчетной схеме
3. Произвести сравнительный анализ разных расчётных схем на восприятие нагрузок
4. Выполнить проверку узлового соединения на модели модульного жилого дома

Жилищный фонд является одним из ключевых элементов социально-экономической сферы любого государства. Его состояние напрямую влияет на качество жизни большинства населения. В России на сегодняшний день стоит вопрос переселения из старого жилищного фонда, который не удовлетворяет стандартам благоприятной жилой среды, и признан аварийным или ветхим. Доля такого жилья с каждым годом лишь увеличивается из-за низких темпов сноса или вывода аварийного

фонда из эксплуатации [1-3]. Поэтому сокращение аварийного жилищного фонда выступает в качестве одной и наиболее важных задач современной жилищной политики» [1]. Требуется разрабатывать высокоэффективные механизмы поддержания технического состояния зданий либо строительства нового жилья. Одним из таких высокоэффективных механизмов может послужить строительство зданий из модульных конструкций [3].

Модульные здания представляют собой универсальные, быстро собираемые и разбираемые конструкции различного назначения. Они создаются на основе стандартных модулей или блок-контейнеров. Данная технология инновационна и с каждым годом набирает все больше оборотов в мире, в том числе и в России. К тому же, она идеально подходит для ситуаций, где нуждается быстрое реагирование для удовлетворения спроса [3-10, 15, 17]. Рынок префаб и модульных конструкций в России активно развивают на данный момент такие компании, как ЕВРАЗ совместно с Knauf [5]. Также торговая марка «MODULBAU» производит два типа модульных конструкций: санитарно-технический модуль и фасадно-стеновой модуль [16].

Модульная конструкция имеет существенные преимущества, среди которых [3-8, 20-24]:

1) Уменьшение сроков возведения объектов, благодаря изготовлению модульных блоков на заводе изготовителя с их готовыми проектными решениями по техническому каталогу.

2) Снижение стоимости проектной документации за счет простоты монтирования с готовыми шаблонами проектирования изготовителя.

3) Повышение безопасности объектов ввиду многочисленных испытаний перед введением модульных блоков на строительную площадку.

4) Сокращение строительных отходов по причине проведения основных работ на заводе изготовителя.

5) Исключение человеческого фактора при помощи автоматизированного производства модульных блоков.

6) Отсутствие «мокрых работ» благодаря автоматизированному производству на заводе изготовителя.

Преимуществом рассматриваемых стальных модульных систем по сравнению с другими материалами, является большая гибкость в архитектурном проектировании благодаря открытой системе каркаса и большим размерам модулей. Скорость строительства стальной модульной системы также выше, поскольку она обычно включает болтовые соединения, в то время как бетонная модульная система часто требует заливки швов на месте. Вес готовых стальных модулей также на порядок ниже, чем бетонных [6].

Однако, как у любой технологии, у модульного строительства есть свои недостатки [6, 11, 18-19]:

- необходимость дополнительных решений в обеспечении пожарной безопасности;
- повышенная ответственность межмодульных соединений;
- усложнение координации строительства;
- повышенные требования к грузоподъемности используемых строительных кранов;
- специальные требования к перевозке.

Особое внимание следует уделять тому, что здания из металлического каркаса, с использованием податливых узловых соединений не соответствуют нормативным по динамической комфортности (пункт В6 СП20.13330.2016) в связи с этим при построение зданий, и достижение достаточной жесткости конструкций необходимо возводить ядро из железобетона, что в свою очередь сильно замедляет процесс возведения здания, из-за необходимости набора бетоном достаточной прочности, а в некоторых регионах в связи с трудностью логистики не является возможным использование бетона.

С межмодульными узловыми соединениями проводится множество исследований, направленных на поиски потенциального решения для повышения их надежности [25-26]. В данной статье предлагается потенциальное решение данной

проблемы, связанное с изготовлением специальных металлических узловых решений, достаточно жестких для обеспечения прохождения норм динамической комфортности, связанных с пребыванием людей на последнем этаже модульного здания и исключает необходимость в железобетонном ядре.

## МЕТОД

Узел, состоит из двух соединительных пластин толщиной 40 мм которые привариваются к стальным колоннам на заводе изготовителе и проваривается полностью, так что мы считаем данное соединение равнопрочным. Пластины соединяют 6 болтов, что обеспечивает достаточную жесткость соединения, и исключает повороты. Болтовые межмодульные соединения просты в монтаже и обеспечивают возможность разборки модульного здания [11-14].



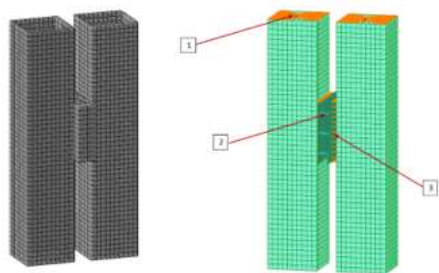
**Рис. 1.** Узловое соединение  
**Fig. 1.** Angular connection

Для проверки работы данного узлового соединения, и проверку передачи усилий и деформаций произведем моделирование узла в различной постановке, с одинаковыми нагрузками в трех расчетных ситуациях.

При разработке проекта модульного здания, во избежание неравномерности осадок, и уменьшения взаимного влияния модулей средняя нагрузка в здании имеет одинаковые значения. В связи с вышесказанным наибольшее взаимное влияние получают крайние узлы сопряжения модулей, воспринимающие наибольшие ветровые нагрузки. Для анализа были выбраны зоны, воспринимающие ветер по X, по Y, а также зона, примыкания к лестничной шахте.

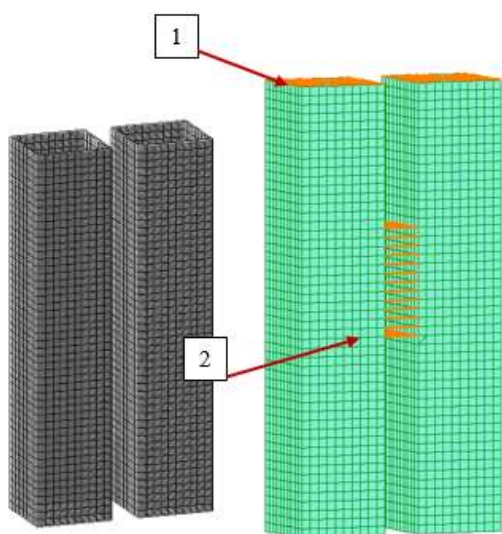
Ниже представлено описание расчетных моделей, построенных в сертифицированном программном комплексе ЛИРА САПР. Расчетные модели построены в стержневой и пластинчатой постановках. При построении моделей использовались особые КЭ – абсолютно жесткие тела (далее АЖТ). Применение АЖТ позволяет

передать необходимые усилия, с учетом эксцентриситета. В следующем пункте данной статьи, следует описание расчётных моделей.



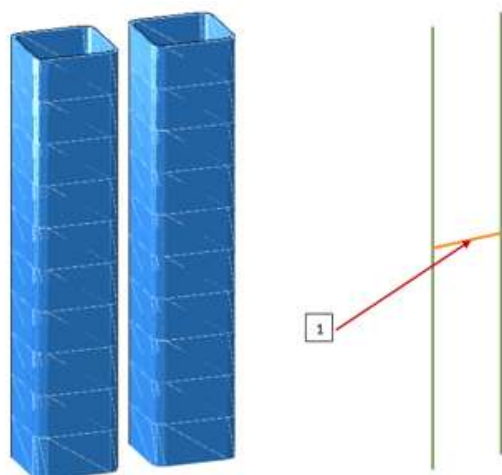
**Рис. 2.** Расчетная модель узла соединения вариант 1  
**Fig. 2.** Calculation model of the connection node option 1

Конечно-элементная модель узла в варианте 1 выполнена в пластинчатой постановке, для равномерного распределения усилий и передаче усилия на колонны, был построен узел, в центре колонны и соединен с помощью АЖТ с основным телом колонны (1). Для соединения пластин, используются стержневые конечные элементы полностью повторяя болтовое соединение (2). Для моделирования сварного соединения пласти и колонны также были применены АЖТ (3).



**Рис. 3.** Расчетная модель узла соединения вариант 2  
**Fig. 3.** Calculation model of the connection node option 2

Конечно-элементная модель узла в варианте 2 выполнена в пластинчатой постановке, для равномерного распределения усилий и передаче усилия на колонны, был построен узел, в центре колонны и соединен с помощью АЖТ с основным телом колонны (1). Соединение колонн происходит при помощи АЖТ (2), данное упрощение было добавлено, для анализа влияния моделирования соединительных пластин и болтов на деформирования расчетной схемы.



**Рис. 4.** Расчетная модель узла соединения вариант 3  
**Fig. 4.** Calculation model of the connection node option 3

Конечно-элементная модель узла в варианте 3 выполнена в стержневой постановке, Соединение колонн происходит при помощи АЖТ (1).

Назначенные характеристики материалов и граничные условия аналогичные во всех трех вариантах конструирования.

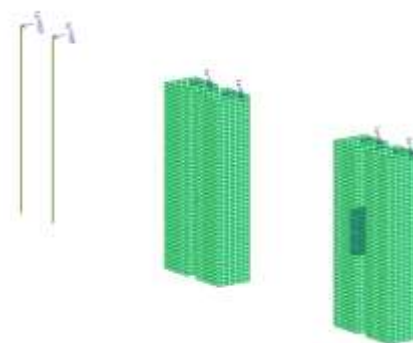
#### Приложение нагрузок

Нагрузка на расчетные модели прикладывается в виде узловой, на центральный узел колонны. Значения прикладываемых нагрузок значительно завышено, для наглядности экспериментов. В данном исследовании рассматривается три расчетные ситуации:

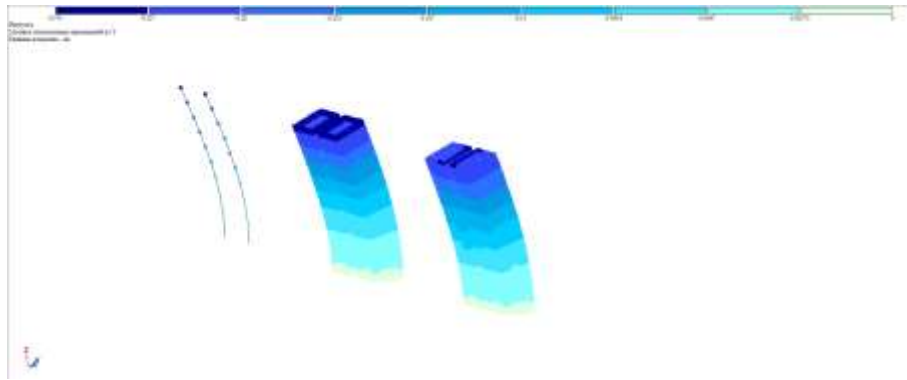
1. Ветер по Y: нагрузка приложена на узел каждой колонны.
2. Ветер по X: нагрузка приложена на узел одной колонны.
3. Примыкание к лестнице: различная вертикальная нагрузка приложена на каждый узел колонны.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Первая расчетная ситуация:



**Рис. 5.** Приложение нагрузок  
**Fig. 5.** Application of loads



**Рис. 6.** Деформированная схема, перемещения по Y  
**Fig. 6.** Deformed diagram, displacement along Y

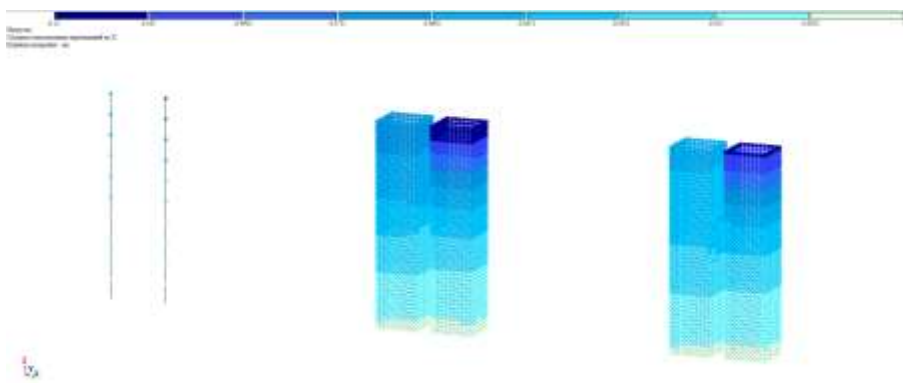
На деформированной схеме, можно заметить, что деформации в различных ситуациях имеют схожий характер, но в первом варианте, с соединительными пластинами, из-за меньшей жесткости соединения, наибольшее перемещение

схемы сосредоточено около узла, а в остальных схемах оно распределено, что может служить дополнительным запасом в итоговом моделировании расчетной схемы.

**Вторая расчетная ситуация:**



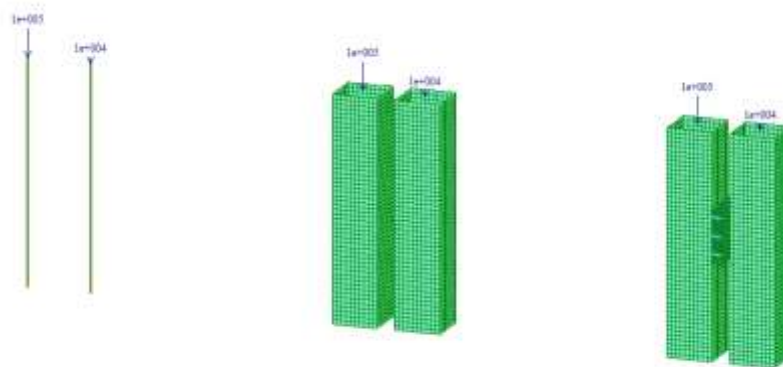
**Рис. 7.** Приложение нагрузок, вторая расчетная ситуация  
**Fig. 7.** Application of loads, the second calculated situation



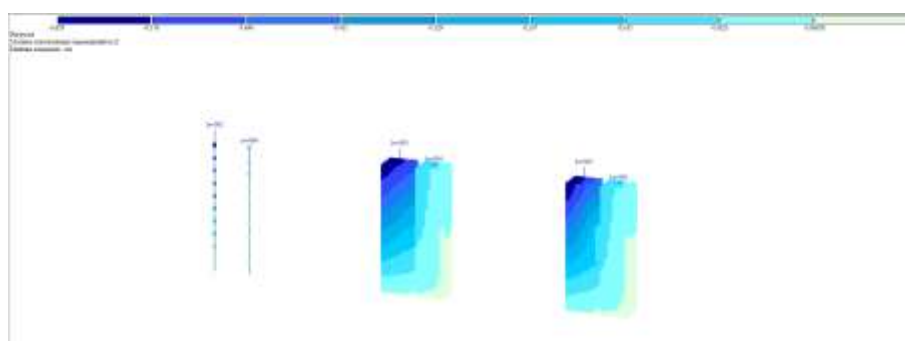
**Рис. 8.** Перемещение по X, вторая расчетная ситуация  
**Fig. 8.** Moving along X, the second calculated situation

Во второй расчетной ситуации мы можем наблюдать схожую картину: характер деформирования одинаков, но в данном моделировании наибольшие различия наблюдаются

во втором примере, где отсутствие соединительных пластин и наиболее жесткое соединения между колоннами показывает наибольшее влияние и передачу усилий в сравнении с другими примерами.

**Третья расчетная ситуация:**

**Рис. 9.** Приложение нагрузок, третья расчетная ситуация  
**Fig. 9.** Application of loads, the third calculated situation



**Рис. 10.** Перемещения по Z, третья расчетная ситуация  
**Fig. 10.** Z-movement, the third calculated situation

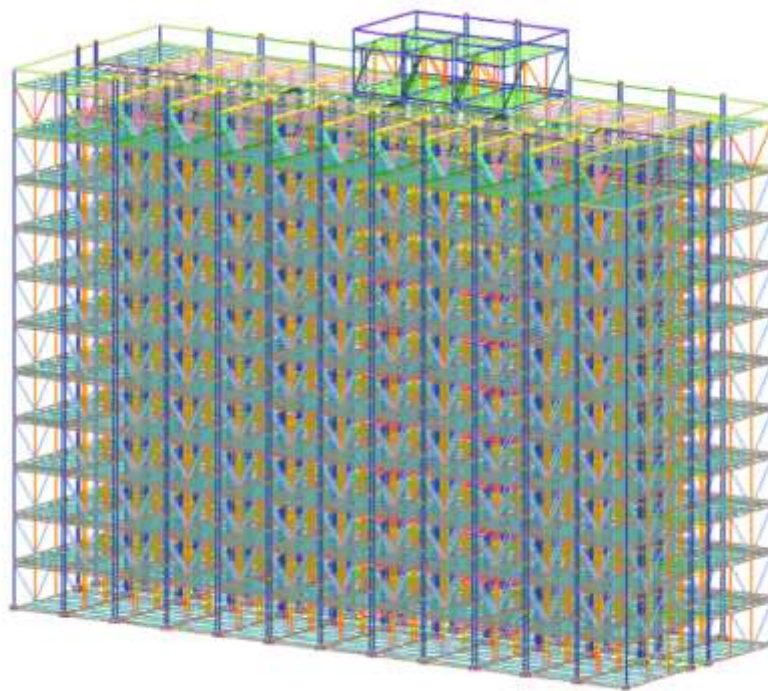
В третьей расчетной ситуации мы видим схожую ситуацию взаимодействия колонн с разной сжимающей силой, наибольшее различие наблюдается в первом варианте с соединительной пластиной. Моделирование данного узла позволяет точнее определить область передачи усилий, что наиболее важно при расчете узловых соединений, но не является необходимым в расчете цельной схемы, так как размер области не вносит вклад в работу цельной конструкции.

В данной работе были построены и проанализированы три варианта построения расчетной схемы узла соединения модельного здания, при этом расчетные схемы были выбраны по пути упрощения: пластинчатая постановка с учетом соединительных пластин и болтов, пластинчатая постановка без учета пластин, болтов и стержневая постановка. На данных схемах были проанализированы три расчетные ситуации: боковой ветер, прямой ветер и различное загружение. В статье [14] представлено аналогичное узловое соединение, состоящее из пластин, жестко приваренных к модульным блокам и скрепленных

болтами, в ней упоминается способность узловых соединений выдерживать большие нагрузки, в том числе сейсмические.

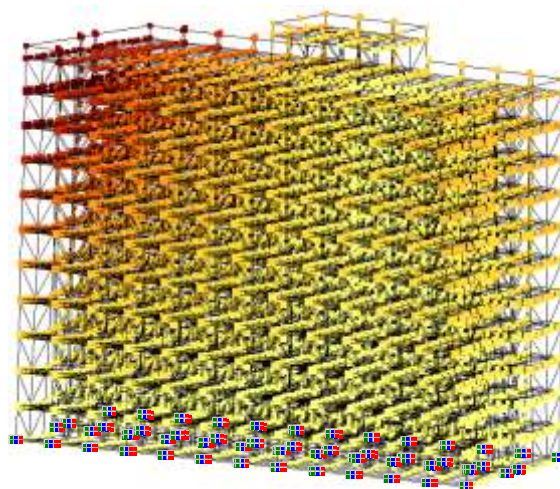
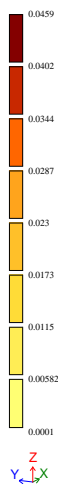
Результаты показали, что особенности моделирования узлового соединения, вносят свой вклад только при точечном расчете самого узла, и не будут влиять на работу цельной конструкции здания, следовательно при построении расчетной схемы всего здания, можно использовать упрощенный вариант моделирования в стержневой постановке с использованием АЖТ.

Для исследования данного узлового соединения, было спроектировано одно подъездное 11 этажное жилое здание из модульных конструкций, на расчетную модель, которая представлена ниже (Рис.11), постоянные, временные и кратковременные нагрузки, включая пульсации ветра в соответствии с СП 20.13330.2016. Сечения всех элементов металлических конструкций были подобраны в соответствии с СП 16.13330.2017. И далее была произведена проверка на динамическую комфортность (Рис.12)



**Рис. 11.** Расчетная схема  
**Fig. 11.** Calculation scheme

Пульсация X  
Составляющая 2  
Матрица ускорений a  
Единицы измерения - м/с<sup>2</sup>  
Массы собраны из элементов: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15



**Рис. 12.** Результаты максимального ускорения  
**Fig. 12.** Results of maximum acceleration

Максимальное ускорение последнего этажа жилого здания не превышает  $0,08 \text{ м/с}^2$ , что удовлетворяет пункту В3 «Динамическая комфортность» в СП 20.13330.2016.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был описан узел соединения модульных блоков, после были рассмотрены способы реализации данного узла в разных постановках и произведен сравнительный

анализ расчетных схем на восприятие нагрузок. На основании полученных результатов, было смоделировано модульное здание, с использованием рассмотренного узлового соединения и доказано прохождение действующих норм динамической комфортности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шнейдерман И. М., Гришанов В. И., Гузанова А. К., Ноздрин Н. Н. Проблемы ветхого и аварийного жилья в России // Народонаселение. 2019. Том 22. № 4. С. 18-35.
2. Сидоренко Е.С., Селезнева Ж.В. Реконструкция зданий и сооружений: основные направления и проблемы // Инновационная наука. 2023. №10-1. С. 30-32
3. Чепелева К.В., Смирнов Е.А. Внедрение модульных систем в практике жилищного строительства сибирского федерального округа // Экономика строительства. 2023. №4. С. 234-238
4. Багаутдинова Л.М. Специфика использования модульных блоков для возведения жилого фонда // Вестник науки. 2023. №6 (63). С. 449-453
5. Бибин А.С. Prefab-технологии в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. №10. С. 44-48.
6. Kotlyarskaya, I., Sinelnikov, A., Iakovlev, N., Vatin, N., Gravit, M. Structural and technological features of modular multi-storey buildings. A review. AlfaBuild. 2022. 23 Article No 2304.
7. Тарханова О.В., Аржиловская А.А.. Модульное строительство как перспектива развития инфраструктуры регионов России // Сборник трудов конференции, Тюменский Индустриальный университет. 2020. С. 607-610.
8. Огородников С.Н. Принципы планировочных решений модульных жилых объектов // Системные технологии. 2022. №1 (42). С. 232-239.
9. Gatheeshgar P, Poologanathan K, Gunalan S, Shyha I, Sherlock P, Rajanayagam H, Nagaratnam B. Development of affordable steel-framed modular buildings for emergency situations (Covid-19) // Structures. 2021. 31. P. 862–875.
10. Lacey, Andrew & Chen, Wensu & Hao, Hong & Bi, Kaiming. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // Engineering Structures. 2019. 198.
11. Liew, Jat Yuen Richard & Chua, Yie & Dai, Ziquan. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Structures. 2019. 21.
12. Широков Вячеслав Сергеевич. Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки. 2022. Том 14. №3.
13. Sukhi V. Sendanayake, David P. Thambiratnam, Nimal Perera, Tommy Chan, Sanam Aghdamy. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections // Heliyon. 2019. 5.
14. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Dai X.-M., Lou., Chen Y. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction // Engineering Structures. 2018. V. 167. P. 407–419.
15. Рыбакова Ангелина Олеговна. Анализ особенностей проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности // Строительство: наука и образование. 2021. №2. С. 65-77
16. Cisse, M., Kosterev, D.A., Vasileva, I.L., Nemova, D.V. Design of Modular Structures and Use of Prefabricated Sanitary Modules // A Review. 2021. 16(1). Article No 1602.
17. Курманова, Е.Е. Модульные здания: преимущества и недостатки / Е.Е. Курманова, В.Д. Таругта // Вестник науки. 2020. Т. 3. № 6. С. 158–160.
18. Liew, J.Y.R., Chua, Y.S., Dai, Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Structures. 2019. 21. P. 135–149.
19. Tachkov, M.A., Shcherbatyuk, P.A., Kirik, E.S., Gravit, M.V., Kotlyarskaya (Vasileva), I.L. Design solutions for residential multi-storey steel modular building // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. 102(3). P. 50.
20. Navaratnam, S., Satheeskumar, A., Zhang, G., Nguyen, K., Venkatesan, S., Poologanathan, K. The challenges confronting the growth of sustainable prefabricated building construction in Australia: Construction industry views // Journal of Building Engineering. 2022. 48.
21. Abdelmageed, S., Zayed, T. A study of literature in modular integrated construction - Critical review and future directions // Journal of Cleaner Production. 2020. 277. Article No 124044.
22. Liu, W., Zhang, H., Wang, Q., Hua, T., Xue, H. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. Advances in Civil Engineering. 2021. V. 2021.
23. Kamali, M., Hewage, K., Sadiq, R. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. Energy and Buildings. 2019. 204. Article No 109479.
24. Luo, Yu & Cheng, Dongwei & Yu, Hang. (2019). Reshaping Dormitory by Modular Steel Structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 690. Article No 012016.
25. Chua, Y.S., Pang, S.D., Liew, J.Y.R., Dai, Z. Robustness of inter-module connections and steel modular buildings under column loss scenarios. Journal of Building Engineering. 2022. 47. Article No 103888.
26. Lee, S.S., Park, K.S., Jung, J.S., Lee, K.S. Evaluation of the structural performance of a novel methodology for connecting modular units using straight and cross-shaped connector plates in modular buildings. Applied Sciences (Switzerland). 2020. 10(22). P. 1–18.

## REFERENCES

1. Shneiderman I.M., Grishanov V.I., Guzanova A.K., Nozdrina N.N. Problems of dilapidated and emergency housing in Russia // Narodonaselenie (Population). 2019. V. 22. No. 4. P. 18-35.
2. Sidorenko E.S., Selezneva Zh.V. Reconstruction of buildings and structures: main

- directions and problems // *Innovative science*. 2023. No. 10-1. P. 30-32
3. Chepeleva K.V., Smirnov E.A. Introduction of modular systems in the practice of housing construction in the Siberian Federal District // *Construction Economics*. 2023. No. 4. P. 234-238
4. Bagautdinova L.M. Specifics of using modular blocks for the construction of housing stock // *Bulletin of Science*. 2023. No. 6 (63). P. 449-453
5. Bibin A.S. Prefab technologies in construction // *Industrial and civil construction*. 2021. No. 10. P. 44-48.
6. Kotlyarskaya, I., Sinelnikov, A., Iakovlev, N., Vatin, N., Gravit, M. Structural and technological features of modular multi-storey buildings. A review. *AlfaBuild*. 2022. 23 Article No 2304.
7. Tarkhanova O.V., Arzhilovskaya A.A.. Modular construction as a prospect for the development of infrastructure in Russian regions // *Collection of conference proceedings, Tyumen Industrial University*. 2020. P. 607-610.
8. Ogorodnikov S.N. Principles of planning solutions for modular residential facilities // *System technologies*. 2022. No. 1 (42). P. 232-239.
9. Gatheeshgar P, Poologanathan K, Gunalan S, Shyha I, Sherlock P, Rajanayagam H, Nagaratnam B. Development of affordable steel-framed modular buildings for emergency situations (Covid-19) // *Structures*. 2021. 31. P. 862–875.
10. Lacey, Andrew & Chen, Wensu & Hao, Hong & Bi, Kaiming. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // *Engineering Structures*. 2019. 198.
11. Liew, Jat Yuen Richard & Chua, Yie & Dai, Ziquan. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // *Structures*. 2019. 21.
12. Shirokov Vyacheslav Sergeevich. Design features of modular buildings // *Bulletin of Eurasian Science*. 2022. V. 14. No. 3.
13. Sukhi V. Sendanayake , David P. Thambiratnam, Nimal Perera, Tommy Chan, Sanam Aghdamy. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections // *Heliyon*. 2019. 5.
14. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Dai X.-M., Lou., Chen Y. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction // *Engineering Structures*. 2018. V. 167. P. 407–419.
15. Rybakova Angelina Olegovna. Analysis of design features based on the use of modular elements of maximum readiness // *Construction: science and education*. 2021. No. 2. P. 65-77
16. Cisse, M., Kosterev, D.A., Vasileva, I.L., Nemova, D.V. Design of Modular Structures and Use of Prefabricated Sanitary Modules // *A Review*. 2021. 16(1). Article No 1602.
17. Kurmanova, E.E. Modular buildings: advantages and disadvantages / E.E. Kurmanova, V.D. Taratuta // *Bulletin of Science*. 2020. Vol. 3. No. 6. P. 158–160.
18. Liew, J.Y.R., Chua, Y.S., Dai, Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // *Structures*. 2019. 21. P. 135–149.
19. Tachkov, M.A., Shcherbatyuk, P.A., Kirik, E.S., Gravit, M.V., Kotlyarskaya (Vasileva), I.L. Design solutions for residential multi-storey steel modular building // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. 102(3). P. 50.
20. Navaratnam, S., Satheeskumar, A., Zhang, G., Nguyen, K., Venkatesan, S., Poologanathan, K. The challenges confronting the growth of sustainable prefabricated building construction in Australia: Construction industry views // *Journal of Building Engineering*. 2022. 48.
21. Abdelmageed, S., Zayed, T. A study of literature in modular integrated construction - Critical review and future directions // *Journal of Cleaner Production*. 2020. 277. Article No 124044.
22. Liu, W., Zhang, H., Wang, Q., Hua, T., Xue, H. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. *Advances in Civil Engineering*. 2021. V. 2021.
23. Kamali, M., Hewage, K., Sadiq, R. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*. 2019. 204. Article No 109479.
24. Luo, Yu & Cheng, Dongwei & Yu, Hang. (2019). Reshaping Dormitory by Modular Steel Structure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 690. Article No 012016.
25. Chua, Y.S., Pang, S.D., Liew, J.Y.R., Dai, Z. Robustness of inter-module connections and steel modular buildings under column loss scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2022. 47. Article No 103888.
26. Lee, S.S., Park, K.S., Jung, J.S., Lee, K.S. Evaluation of the structural performance of a novel methodology for connecting modular units using straight and cross-shaped connector plates in modular buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10(22). P. 1–18

## NODAL SOLUTIONS IN STEEL MODULAR BUILDINGS FOR RESETTLEMENT FROM EMERGENCY AND DILAPIDATED HOUSING

Tsareva O.S., Kozodaeva V.S., Andreev V.M., Sviridenko D.A..

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)  
195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29  
e-mail: valeriia.kozodoy@mail.ru

**Abstract:** In Russia, there is an increasing concern about the need for relocation from old housing that does not meet modern standards of living and is considered to be in emergency or dilapidated condition. The share of such housing continues to grow every year, making it one of the most significant challenges of modern housing policies.

**The subject of the study.** The subject of the study is the nodal connection of metal modular structures, which ensures spatial rigidity and compliance with the requirements of standards for dynamic comfort. In the context of accelerated construction and the need to relocate citizens from emergency housing, modular buildings are becoming one of the most promising areas. However, structures based on a metal frame with malleable joints often do not meet the standards for vibration comfort, which requires the development of new technical solutions.

**Materials and methods.** The developed joint consists of two connecting plates 40 mm thick, welded to the columns, followed by bolting. To evaluate the efficiency of the node, three variants of finite element models were built: a plate model with bolts and welding, a simplified plate model without connection details, and a rod model using absolutely rigid bodies (AGT). All models were calculated in LIRA-CAD using three types of loads: frontal and side wind, as well as the load at the stairwell.

**Results.** Calculations have shown that when using a simplified model, the accuracy remains acceptable for a global assessment of load-bearing capacity. An inspection of the simulated 11-storey building confirmed that the standards for dynamic comfort had been met: acceleration on the last floor was 0.08 m/s<sup>2</sup>.

**Conclusions.** The proposed nodal connection provides the necessary rigidity without the use of a reinforced concrete core, which simplifies the construction of modular buildings and shortens the time of their construction, while maintaining compliance with current regulations. Additionally, the versatility of the design allows it to be adapted to various architectural and engineering solutions, providing design flexibility in conditions of mass housing construction.

**Key words:** emergency housing, modular structures, metal frame, nodal connections, modular construction, prefabrication.



УДК 69.057:69.059.7

## ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ ШЕСТИМЕТРОВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РЕБРИСТЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ СТАЛЬНЫМИ БАЛКАМИ-ШПРЕНГЕЛЯМИ ОРИГИНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Богущая А.Ю.<sup>1</sup>, Чаплыгин В.А.<sup>2</sup>, Шаленный В.Т.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт «Академия строительства и Архитектуры», ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
адрес: 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181,  
E-mail: <sup>1</sup>abogutskaya2004@mail.ru; <sup>2</sup>akvamarin.simf@mail.ru; <sup>3</sup>v\_shalennyj@mail.ru,

**Аннотация.** В работе получила дальнейшее развитие технология усиления ребристых железобетонных плит покрытия подкладочными стальными балками-шпренгелями. Ссылаясь на ранее опубликованные материалы по результатам обследования конструкций покрытия производственного корпуса ООО «РОССНАБ», а также предложенного там способа усиления отобранных плит, описывается запатентованная конструкция стальных элементов усиления. Обосновывается целесообразность, рассматриваются варианты и предлагаются рекомендуемые организационно-технологические схемы производства работ по восстановлению указанного объекта с использованием инновационных элементов усиления.

**Предмет исследования:** конструкция, технология и организация производства работ по усилению шестиметровых железобетонных ребристых плит покрытия производственного корпуса ООО «РОССНАБ».

**Материалы и методы:** анализ состояния вопроса по литературным и патентным источникам, обоснование целесообразности и моделирование конструкции, технологии и организации реконструкционных работ на конкретном объекте, оценка социально-экономической эффективности и производственной безопасности предлагаемых инноваций.

**Результаты:** обоснованно представлены конструкция и организационно-технологические схемы усиления шестиметровых ребристых железобетонных плит покрытия стальными подкладочными балками-шпренгелями.

**Выводы:** Показана целесообразность и обоснованное направление совершенствования технологии усиления железобетонных плит покрытия пролетом 6 м; представлена конструкция, технология и организация работ по усилению указанных конструкций покрытия на конкретном строительном объекте - производственном корпусе ООО «РОССНАБ». Спрогнозированы возможные способы механизации монтажа шпренгельных конструкций усиления с размещением инновационных механизмов на средствах подмащивания – вышках-турах.

**Ключевые слова:** железобетонная ребристая плита, усиление, стальная балка-шпренгель, технология и организация производства работ.

### ВВЕДЕНИЕ

Данная работа содержит развитие ранее опубликованной статьи [1]. В ней, с учетом состояния вопроса и возможностей реализации известной конструктивно-технологической системы усиления стальными балками-шпренгелями со стяжными муфтами [2, с. 285], обоснованно излагается ее запатентованное совершенствование и возможное использование на конкретном строительном объекте - производственном корпусе ООО «РОССНАБ».

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кроме обзора, приведенного в указанной статье, а также изложенных там же результатов обследования конструкций покрытия указанного в названии объекта, дополнительно отметим позже опубликованные или обнаруженные разработки. Из таких, прежде всего, отмечаем запатентованные способы усиления многопустотных железобетонных плит перекрытий путем устройства шпренгельных затяжек, наклонно проходящих через тело и пустоты в таких плитах [3 и 4].

Появились публикации и патенты, предлагающие усиление изгибаемых железобетонных элементов и композитными

материалами. К последним из которых отнесем и патент, полученный учеными Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева. Согласно описанию к этому патенту, после устройства отверстий в многопустотной плите, на нижнюю поверхность каждой ее пустоты нагнетают клеевой состав с последующим его распределением по поверхности с помощью эллипсоидного валика, и, путем попеременного натяжения и отпускания троса, производят разравнивание клеевого состава. После этого, к одному из концов троса прикрепляют элемент усиления, выполненный в виде композиционной ламели, вынимают эллипсоидный валик из пустоты и осуществляют протягивание композиционной ламели по всей длине пустоты, опускают ее на клеевой состав и прикатывают к нижней поверхности пустоты эллипсоидным валиком, аналогично процессу выравнивания клеевого состава. Затем в отверстия пустот вставляют кронштейны с опиранием их на композиционную ламель, а по периметру верха кронштейна наносят герметик и заделывают отверстия быстротвердеющим бетоном [5].

Специалисты Казанского государственного архитектурно-строительного университета (КазГАСУ), для усиления продольных несущих ребер железобетонных плит покрытия, предложили усиление указанных ребер при помощи полимер композитного корытообразного профиля, монтируемого под этими ребрами [6]. Технология предполагает обнажение рабочей арматуры

продольных ребер, приварку к ней попарных коротышей, к которым на болтах закрепляют корытообразный профиль. Этот профиль заполняют специальным раствором, после твердения которого несущую систему перекрытия или покрытия можно загружать проектной нагрузкой.

Известно также множество подобных способов и устройств для усиления железобетонных и стальных балок, а также ребристых плит, реализующих принцип создания предварительного напряжения и связанного с ним обратного выгиба этих элементов за счет монтажа и включения в работу специальных шпренгелей со стальными затяжками. Например, в полезной модели по патенту RU № 130333U1, представлен шпренгель, состоящий из двух симметричных стержневых ветвей, закрепленных между собой в верхней части железобетонного элемента через сжатые элементы, а в нижней части - через опорный стержень, установленный по низу железобетонного элемента в месте перегиба ветвей. Причем ветви шпренгеля выполнены трапециевидными и снабжены дополнительным опорным стержнем, расположенным по низу балки в месте второго перегиба ветвей. Кроме этого, каждая ветвь дополнительно содержит натяжные устройства, например, в виде муфт или талрепов, а наклонные стороны ветвей выполнены из двух стержней и соединены между собой с помощью указанных натяжных устройств [7]. Однако такая шпренгельная система достаточно сложна в подготовке и монтаже хотя бы потому, что предполагает использование нескольких (но не менее двух) натяжных устройств.

Известен также способ усиления стальной балки дополнительным предварительно напряженным стальным шпренгелем, временно монтируемом на вертикальных стойках, через которые устанавливаются постоянная и временная затяжки обеих шпренгелей по патенту на изобретение RU № 2209278C1 [8]. При этом усилие натяжения во временной затяжке создается за счет подвешивания к ней дополнительного груза. Такая система усиления также является достаточно громоздкой в монтаже и демонтаже ее съемной части, но метод создания усилия предварительного напряжения в затяжке путем приложения к горизонтальной ее части вертикально направленного усилия, представляется нам достаточно перспективным и эффективным.

А в качестве прототипа при патентовании принята полезная модель № 155488U1 того же КазГАСУ, включающая двутавр цельного или составного сечения, приваренные к нему поперечные стержни и пропущенные через них преднапрягающие продольные стержни. Их концы попарно закреплены в торцевых частях балки, а также вертикально размещенные в средней зоне балки резьбовые натяжители продольных стержней. Здесь натяжители и создают вертикально направленное воздействие на горизонтальную часть затяжек, как и в нашем, ниже представленном

предложении. Поэтому именно эта полезная модель выбрана нами в качестве прототипа. Но такая балка должна иметь, и очевидно имеет большую рабочую высоту двутавра по сравнению с его длиной, что и позволяет разместить преднапрягаемые стержни и их натяжители внутри пространства двутавра, с двух сторон от его вертикальной стенки [9].

Недостатком такой преднапряженной сталебетонной балки является не возможность применить ее для усиления существующих конструкций, работающих на изгиб. Общепринято называть такие конструкции усиления шпренгельными. Определенные трудности могут возникнуть и при изготовлении известной винтовой муфты и тяжей с правой и левой резьбой М16, используемых при устройстве усиления железобетонных плит покрытия производственного корпуса, представленные в [1]. Не представлена там и предпочтительная технология производства работ, контроль и фиксация натяжения шпренгельной системы.

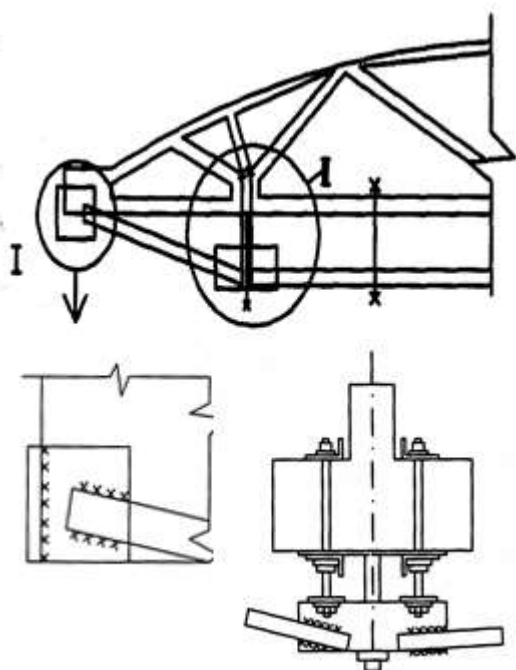
**Цель** данной статьи – обоснованно предложить и описать новую конструкцию и базирующуюся на ней, технологию усиления конструкций покрытия, учитывающую отмеченные недостатки, их фактическое состояние и возможности устройства на конкретном строительном объекте.

#### **Задачи:**

- Анализ состояния вопроса с обоснованием целесообразности, направления и эффективности применения элементов усиления шестиметровых ребристых плит покрытия в виде подкладочных стальных балок шпренгельного типа;
- Разработка, описание и патентование разработанной конструкции усиления в виде стальных подкладочных балок шпренгельного типа;
- Разработка и предварительная оценка ожидаемой эффективности и безопасности производства работ по предложенной их технологии и организации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗРАБОТКИ**

Следует признать, что теоретической основой излагаемых ниже конструктивно-технологических решений, послужил опыт усиления предварительно напряженных железобетонных ферм, осуществленный при строительстве еще в 70-х годах, спортивного зала бывшего Днепропетровского инженерно-строительного института, освещенный в «грифованном» учебном пособии, изданном еще в 2010г. [10, с.125]. Произведенное без разгрузки конструкций, усиление ферм с повышением их трещиностойкости осуществлялось с помощью винтового распорного приспособления, конструкция которого представлена на Рис.1. Настолько нам известно, отбракованные еще на заводе-изготовителе и усиленные на месте установленным способом, стропильные железобетонные фермы эксплуатируются там и до настоящего времени.



**Рис. 1.** Конструктивная схема усиления стропильной железобетонной фермы стальными шпренгельными затяжками с созданием в них натяжения распорными усилиями

**Fig. 1.** A constructive scheme for strengthening a rafter reinforced concrete truss with steel sprengel puffs with the creation of tension in them by spacer forces

Учитывая представленный опыт и проанализированные патентные источники, а также выбранный прототип, для решения одной из поставленных задач, нами предложены ниже следующие его совершенствования. В преднапряжённой стальной балке-шпренгеле, включающей двутавр цельного или составного сечения, приваренные к нему поперечные стержни и пропущенный через них преднапрягающий продольный стержень, концы которого закреплены в торцевых частях балки, а также вертикально размещенный в средней зоне балки резьбовой натяжитель продольного стержня, предложено преднапрягающий продольный стержень и натяжитель смонтировать под двутавром, а натяжитель выполнить в виде скобы, дугообразной своей частью размещенной в отверстии стенки двутавра.

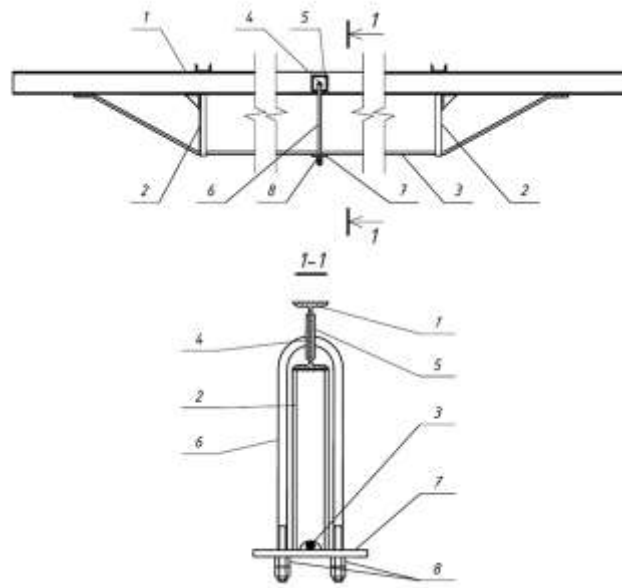
Как вариант конструктивного исполнения, для перераспределения сминающих усилий в стенке двутавра, предложено отверстие под скобу просверлить в зоне нулевых нормальных напряжений его вертикальной стенки (в центре его симметрии) и обрамить, например, двухсторонними шайбами [11].

Предлагаемая конструкция стальной балки усиления с перечисленными отличительными признаками поясняется графическими материалами, представленными на Рис.2 - ее общий вид сбоку, а ниже – разрез 1-1.

В разработанном и реализованном проектом решении, балка усиления представляет собой прокатный двутавр 1 по сортаменту №12, а по его краям снизу приварены поперечные стержни 2 из швеллеров №6,5, через которые (в углублениях) пропущен продольный стержень-затяжка 3. Она закреплена на торцевых частях двутавра 1 электросваркой к его нижней полке. В центре двутавра 1 просверлено отверстие 4, обрамленное шайбами 5, приваренными с двух сторон от двутавра 1. В это отверстие 4 вставлена скоба 6 с резьбой на обоих концах. Ветви скобы 6 охватывают затяжку 3, а под ней на скобу 6 одета горизонтальная планка 7, затянутая гайками 8.

Установка и включение в работу предлагаемой балки усиления шпренгельной затяжкой заключается в нижеследующем. Под усиливаемой конструкцией (на ранее представленной схеме Рис.2 не показана) устраиваются узлы опирания и освобождается пространство для подведения, собранного двутавра 1, вместе со швеллерами 2 и затяжкой 3. В отверстие 4, обрамленное приваренными шайбами 5, вставляют скобу 6 так, чтобы затяжка 3 оказалась внутри скобы 6. На скобу 6 наживляют планку 7 при помощи гаек 8. В таком, подготовленном к установке состоянии, балка монтируется под усиливаемой конструкцией. При необходимости (больших зазорах), сверху двутавра 1 ставят подкладки, ликвидирующие этот зазор. В системе, завинчиванием гаек 8 через скобу 6 и затяжку 3, создается выгиб вверх двутавра 1 в вертикальном направлении. Таким образом балка-шпренгель включается в работу для совместного восприятия нагрузок после реконструкции.

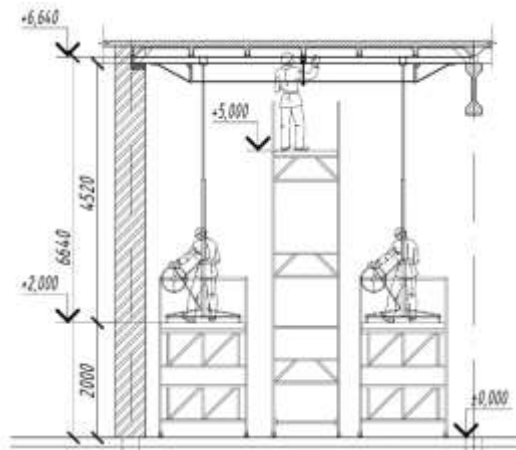
Следовательно, по сравнению со всеми проанализированными аналогами, включая обоснованно выбранный прототип, предлагаемая конструкция балки-шпренгеля отличается признаками новизны и многообразной применимости, а также, связанным с этими признаками, положительном эффекте. Он заключается в возможности применения предложений в качестве подкладочной под основную усиливаемую плитную или балочную железобетонную конструкцию при ее модернизации, что позволит произвести работы по монтажу и включению в работу предлагаемой балки-шпренгеля без привлечения громоздкого подъемно-транспортного оборудования. .



**Рис. 2.** Конструкция инновационной стальной балки-шпренгеля для усиления шестиметровых ребристых плит покрытия

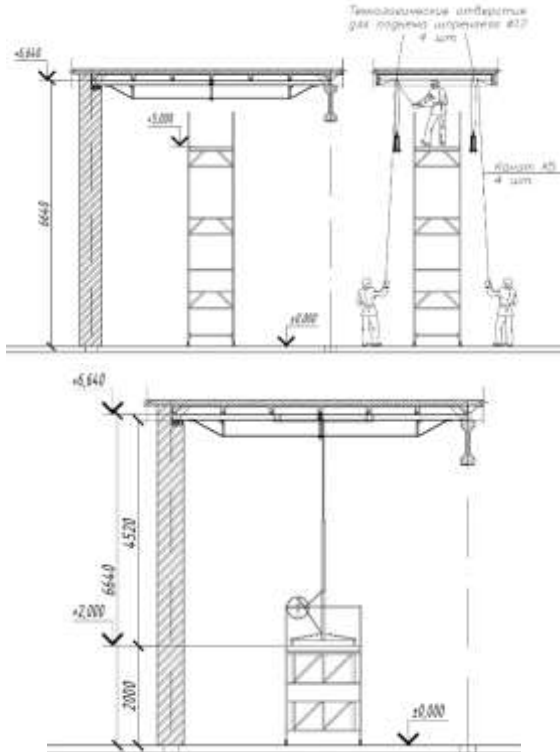
**Fig. 2.** The design of an innovative steel sprenzel beam to strengthen six-meter ribbed coating plates

Согласно предварительным прикидочным расчетам и рабочего проектирования, максимальный вес монтируемой системы усиления железобетонной ребристой плиты покрытия размером 3х6 м не должен превысить 80 кг. В связи с чем, прорабатывались ниже следующие варианты организации производства работ (Рис. 3). Прежде всего, возможно произвести подготовку и монтаж предложенных элементов усиления вручную двумя монтажниками, размещенными на средствах подмащивания, например, передвижных вышках-турах производства «Строймастер» с максимальной нагрузкой на настил в 200 кг/кв. м.



**Рис. 3.** Рассмотренные организационно-технологические схемы монтажа подкладочной стальной балки-шпренгеля под усиливаемой ребристой плитой покрытия

**Fig. 3.** The considered organizational and technological schemes of installation of a lining steel sprenzel beam under a reinforced ribbed coating plate



По первой схеме, находясь на рабочем настиле, рабочие подготавливают площадки опирания под балку-шпренгель, а для ее подъема, в поперечных ребрах плиты покрытия пробуривают отверстия диаметром 12 мм. Через пропущенный в них стальной или капроновый канат осуществляется подъем и ориентация собранной балки-шпренгеля. Поворотом и наклоном, она заводится в подготовленные посадочные места и, после проверки положения, ее включают в работу путем расклинки в зазорах между поперечными ребрами железобетонной плиты и верхним поясом стальной балки. Под каждую усиливаемую плиту необходимо установить две подкладочные балки усиления. Чтобы отверстия не повреждать ребра плиты, как вариант, возможно на них смонтировать струбцины,

через которые запасовывать тросы для подъема конструкции балки усиления.

В последнее время, появились видеоролики, а в торговых сетях продаются специальные подъемники для монтажа листов гипсокартона на потолочные несущие профили, например, марки DLT Panel Lifter [12]. Взяв за основу механизм подъема и стойки указанного подъемника, предлагаем приспособить его и для механизированного монтажа наших элементов усиления. Кроме этого, уже многократно апробированного китайского решения, наши умельцы-«самоучки» с той же целью – механизации подъема и фиксации перед постоянным закреплением листов гипсокартона на потолочном каркасе, предлагают использование как ручных лебедок [13], так и оригинальных домкратов-толкателей выдвижной трубы-держателя [14]. Поэтому, в дальнейших научно-проектных изысканиях, возможна разработка и оригинального технологического оснащения монтажа предложенной системы усиления.

Так как производство работ возможно без полной разгрузки конструкций покрытия, предлагаемый способ восстановления несущей способности железобетонных плит покрытия нам представляется экономичным и безопасным, не требующим полной и длительной остановки производственных процессов внутри объекта реконструкции.

## ВЫВОДЫ

Показана целесообразность и обоснованное направление совершенствования технологии усиления железобетонных плит покрытия пролетом 6 м; представлена конструкция, технология и организация работ по усилению указанных конструкций покрытия на конкретном строительном объекте - производственном корпусе ООО «РОССНАБ». Спрогнозированы возможные способы механизации монтажа шпренгельных конструкций усиления с размещением инновационных механизмов на средствах подмащивания – вышках-турах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богущкий, Ю. Г. Обследование и усиление плит покрытия производственного корпуса ООО "РОССНАБ" / Ю. Г. Богущкий // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. – № 33(85). – С. 31-39. – DOI 10.29039/2413-1873-2024-33-31-39. – EDN AEYNJX.

2. Абрамян, С. Г. Технология и организация реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 08.05.01 - "Строительство уникальных зданий и сооружений" / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко. – Волгоград: Волгоградский

государственный технический университет, 2022. – 303 с. – ISBN 978-5-9948-4356-7. – EDN BGLFCO.

3. Патент на полезную модель № 190212 U1 Российская Федерация, МПК E04G 23/02, E04C 5/08. Конструкция усиления сборной железобетонной многопустотной плиты перекрытия: № 2019111368: заявл. 16.04.2019: опубл. 24.06.2019 / Д. Р. Маилян, П. А. Сербиновский, А. В. Сербиновский; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ). – EDN TNLPZI.

4. Патент на полезную модель № 190218 U1 Российская Федерация, МПК E04C 5/08, E04G 23/02. Конструкция усиления железобетонной многопустотной плиты перекрытия: №2019111513: заявл. 17.04.2019: опубл. 24.06.2019 / Д. Р. Маилян, П. А. Сербиновский, А. В. Сербиновский; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ). – EDN KLXFAX.

5. Патент № 2822894 C1 Российская Федерация, МПК E04G 23/02. Способ усиления сборных железобетонных многопустотных плит перекрытий композитными материалами: № 2023128160: заявл. 30.10.2023: опубл. 16.07.2024 / А. А. Хлыстунов, Ю. А. Бирюков, А. Н. Бирюков [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации. – EDN OEYFNO.

6. Патент № 2827598 C1 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Способ усиления железобетонных балок при помощи полимеркомпозитного профиля: № 2024107425: заявл. 21.03.2024: опубл. 30.09.2024 / Зиннуров Тагир Альмирович (RU), Еремеев Даниил Валерьевич (RU) – 5 с., заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет" (КазГАСУ) (RU)

7. Патент на полезную модель № 130333 U1 Российская Федерация, МПК E04G 23/02. Шпренгель для усиления и обеспечения живучести изгибаемого железобетонного элемента: № 2013105508/03: заявл. 08.02.2013: опубл. 20.07.2013 / В. С. Плевков, Г. И. Однокопылов, И. В. Богатырева; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный архитектурно-строительный университет" (ТГАСУ). – EDN EPWXVW.

8. Патент № 2209278 C1 Российская Федерация, МПК E04C 3/10. Способ усиления балки предварительно напряженным шпренгелем: № 2002122068/03: заявл. 12.08.2002: опубл. 27.07.2003

/ В. В. Егоров, Е. Н. Алексашкин, М. П. Забродин, М. И. Голоскок; заявитель Петербургский государственный университет путей сообщения. – EDN MRBPEH.

9. Патент на полезную модель № 155488 U1 Российская Федерация, МПК E04G 23/02. преднапряженная сталебетонная балка: № 2015102306/03: заявл. 26.01.2015: опубл. 10.10.2015 / Ф. С. Замалиев, Э. Ф. Замалиев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет" КГАСУ. – EDN UCMIBN.

10. Реконструкція промислових та цивільних будвель: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів будівельних спеціальностей / А. М. Березюк, В. Т. Шаленный, К. Б. Дикарев, А. А. Кириченко. – Дніпропетровськ: ТОВ "ЕНЕМ", 2010. – 184 с. – ISBN 978-966-8911-23-1. – EDN ZWSDAV.

11. Патент №229723 U1 Российской Федерация, МПК E04C 3/10; E04G 23/02. Преднапряжённая стальная балка-шпренгель: № 202412160: заявл. 29.07.2024: опубл. 23.10.2024 / Богуцкая Анна Юрьевна (RU), Богуцкий Юрий Григорьевич (RU), Шаленный Василий Тимофеевич (RU), Чаплыгин Владимир Анатольевич (RU), Кондратьев Алексей Владимирович (RU) – 5 с., заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского" (RU)

12. Подъемник для гипсокартона! Применение! Обзор! Режим доступа: [youtu.be URL: https://youtu.be/eLiUr8d7TyY?si=HiOM2AYtspWl6oUz](https://youtu.be/eLiUr8d7TyY?si=HiOM2AYtspWl6oUz) (дата обращения: 20.10.2024).

13. Подъемник для гипсокартона DRIVE2 Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/560949667966223745/>. (Дата обращения: 09.10.2024г).

14. Секрет монтажа гипсокартона! Подъемник для плитных материалов, гипсокартона и OSB листов своими руками. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/8f845b123e9931ae3e05ab6842755c3e/>. Дата обращения: 09.10.2024г.

## REFERENCES

1. Bogutsky, Y. G. Inspection and reinforcement of the coating plates of the production building of ROSSNAB LLC / Y. G. Bogutsky // Construction and technogenic safety. – 2024. – № 33(85). – Pp. 31-39. – DOI 10.29039/2413-1873-2024-33-31-39. – EDN AEYNJX.

2. Abrahamyan, S. G. Technology and organization of reconstruction and capital repairs of buildings and structures: Textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty 08.05.01 - "Construction of unique buildings and structures" / S. G. Abrahamyan, O. V. Burlachenko. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2022. – 303 p. – ISBN 978-5-9948-4356-7. – EDN BGLFCO.

3. Utility Model Patent No. 190212 U1 Russian Federation, IPC E04G 23/02, E04C 5/08. Reinforcement structure of a prefabricated reinforced concrete multi-cavity floor slab: No. 2019111368: application. 04/16/2019: publ. 06/24/2019 / D. R. Mailyan, P. A. Serbinovsky, A.V. Serbinovsky; applicant Federal State budgetary educational institution of Higher education "Don State Technical University" (DSTU). – EDN TNLPZI.

4. Utility Model Patent No.190218 U1 Russian Federation, IPC E04C 5/08, E04G 23/02. Reinforcement structure of reinforced concrete multi-cavity floor slab: No.2019111513: application 17.04.2019: publ. 24.06.2019 / D. R. Mailyan, P. A. Serbinovsky, A.V. Serbinovsky; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University" (DSTU). – EDN KLXFAX.

5. Patent No. 2822894 C1 Russian Federation, IPC E04G 23/02. Method of reinforcement of precast reinforced concrete multi-hollow floor slabs with composite materials: No. 2023128160: application 30.10.2023: publ. 16.07.2024 / A. A. Khlystunov, Yu. A. Biryukov, A. N. Biryukov [et al.]; the applicant is the Federal State State-owned Military Educational Institution of Higher Education "Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev" of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – EDN OEYFNO.

6. Patent No.2827598 C1 Russian Federation, IPC E04G 23/00. Method of reinforcing reinforced concrete beams using a polymer composite profile: No. 2024107425: application 03/21/2024: publ. 30.09.2024 / Zinnurov Tagir Almirovich (RU), Yermeev Daniil Valerievich (RU) – 5 p., applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State University of Architecture and Civil Engineering" (KazGASU) (RU)

7. Patent for utility model No. 130333 U1 Russian Federation, IPC E04G 23/02. Sprengel for strengthening and ensuring the survivability of a bent reinforced concrete element: No. 2013105508/03: application 08.02.2013: publ. 20.07.2013 / V. S. Plevkov, G. I. Odnokopylov, I. V. Bogatyreva; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering" (TSASU). – EDN EPWXVW.

8. Patent No. 2209278 C1 Russian Federation, IPC E04C 3/10. Method of reinforcing a beam with a prestressed sprengel: No. 2002122068/03: application 12.08.2002: publ. 27.07.2003 / V. V. Egorov, E. N. Aleksashkin, M. P. Zabrodin, M. I. Goloskok; applicant St. Petersburg State University of Railway Engineering. – EDN MRBPEH.

9. Utility model patent No. 155488 U1 Russian Federation, IPC E04G 23/02. prestressed steel concrete beam: No. 2015102306/03: application 26.01.2015: publ. 10.10.2015 / F. S. Zamaliev, E. F. Zamaliev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Kazan

State University of Architecture and Civil Engineering" KGASU. – EDN UCMIBN.

10. Reconstruction of the promislavikh of the civil budivel: A comprehensive textbook for students of the higher educational institutions / A.M. Berezyuk, V. T. Shalennyj, K. B. Dikarev, A. A. Kirichenko. – Dnepropetrovsk: TOV "ENEM", 2010. – 184 p. – ISBN 978-966-8911-23-1. – EDN ZWSDAV.

11. Patent No.229723 U1 Russian Federation, IPC E04C 3/10; E04G 23/02. Prestressed steel beam-sprengel: No. 202412160: application. 07/29/2024: publ. 10/23/2024 / Bogutskaya Anna Yuryevna (RU), Bogutsky Yuri Grigorievich (RU), Shalenny Vasily Timofeevich (RU), Chaplygin Vladimir Anatolyevich (RU), Kondratiev Alexey Vladimirovich (RU) – 5 p., applicant Federal State Autonomous Educational

Institution Higher education institution "V.I. Vernadsky Crimean Federal University" (RU)

12. Drywall lift! Application! Overview! Access mode: youtu.be URL: <https://youtu.be/eLiUr8d7TyY?si=HiOM2AYtspWl6oUz> (date of application: 10/20/2024).

13. Drywall lift DRIVTE2 Access mode: <https://www.drive2.ru/b/560949667966223745/>. (Date of application: 09.10.2024).

14. The secret of drywall installation! A lift for slab materials, drywall and OSB sheets with your own hands. Access mode: <https://rutube.ru/video/8f845b123e9931ae3e05ab6842755c3e/>. Date of application: 09.10.2024

## TECHNOLOGY OF REINFORCEMENT OF SIX-METER REINFORCED CONCRETE RIBBED SLABS WITH STEEL BEAMS-SPANGLES OF THE ORIGINAL DESIGN

Bogutskaya A.Y.<sup>1</sup>, Chaplygin V.A.<sup>2</sup>, Shalenny V.T.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Academy of Construction and Architecture, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Address: 295943, Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya str., 181  
E-mail: <sup>1</sup>abogutskaya2004@mail.ru; <sup>2</sup>akvamarin.simf@mail.ru; <sup>3</sup>v\_shalennyj@mail.ru,

**Abstract.** The work has further developed the technology of reinforcing ribbed reinforced concrete slabs with lining steel girders. Referring to previously published materials based on the results of a survey of the coating structures of the production building of ROSSNAB LLC, as well as the method proposed there for reinforcing selected plates, the patented design of steel reinforcement elements is described. The expediency is justified, options are considered and recommended organizational and technological schemes for the restoration of the specified object using innovative reinforcement elements are proposed.

**Subject of research:** design, technology and organization of work on strengthening six-meter reinforced concrete ribbed slabs covering the production building of ROSSNAB LLC.

**Materials and methods:** analysis of the status of the issue according to literary and patent sources, justification of expediency and modeling of the design, technology and organization of reconstruction work at a specific facility, assessment of socio-economic efficiency and industrial safety of the proposed innovations.

**Results:** the design and organizational and technological schemes of reinforcement of six-meter ribbed reinforced concrete slabs with steel lining beams-sprengels are reasonably presented.

**Conclusions:** The expediency and justified direction of improving the technology of reinforcing reinforced concrete slabs with a span of 6 m is shown; the design, technology and organization of work to strengthen these coating structures at a specific construction facility - the production building of ROSSNAB LLC is presented. The possible ways of mechanization of the installation of spangled reinforcement structures with the placement of innovative mechanisms on lifting equipment – towers-tours are predicted.

**Key words:** reinforced concrete ribbed plate, reinforcement, steel sprengel beam, technology and organization of work.



УДК: 666.9:691.32

## КАРБОНИЗАЦИЯ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И СВЕЖЕОТФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННОЙ ВИБРОПРЕССОВАННОЙ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ

Бородин<sup>1</sup> С.С., Федоркин<sup>2</sup> С.И., Макарова<sup>3</sup> Е.С.

<sup>1</sup>ООО «Актив Групп»,  
297540, Республика Крым, Симферопольский р-н, с. Родниково, тер. Комплекс зданий и сооружений 1,  
e-mail: sborodin@ag-ru.com

<sup>2,3</sup>Институт «Академия строительства и Архитектуры», ФГАОУ ВО «ЖФУ им. В.И. Вернадского»  
адрес: 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181,  
e-mail: kfu.fedorkin@mail.ru

**Аннотация:** В настоящей статье представлены результаты заводских испытаний по определению эффективности карбонизации сырьевой смеси и свежееотформованных изделий при производстве вибропрессованной тротуарной плитки. При карбонизации сырьевой смеси углекислый газ использован в качестве добавки в бетон в процентном отношении от массы вяжущего. Карбонизация свежееотформованных изделий производилась в среде газо-воздушной смеси с определенной концентрацией CO<sub>2</sub>. Определена кинетика набора прочности готовых изделий в течении 28 суток, а также показатели плотности и водопоглощения.

**Предмет исследования:** влияние карбонизации сырьевой смеси и свежееотформованных изделий на физико-механические свойства вибропрессованной тротуарной плитки.

**Материалы и методы:** жесткая бетонная смесь с использованием в качестве вяжущего шлакопортландцемента ЦЕМ II/A-Ш 42,5Н. Смесь приготовлена в промышленном планетарном смесителе объемом 1,1м<sup>3</sup>. Тротуарная плитка изготовлена на виброударном промышленном прессе с формовочным полем 1300\*900 и возмущающей силой 140кН. Подача необходимого количества CO<sub>2</sub> в смеситель и в камеру набора прочности количественно контролировалась с помощью наполных весов. Испытания на прочность при сжатии проведены в лаборатории предприятия с использованием прессы для бетона ИП-1500 по ГОСТ 28570-19. Водопоглощение образцов определено в соответствии с ГОСТ 12730.3-2020.

**Результаты:** в ходе производственных испытаний выявлен рост прочности вибропрессованных бетонных изделий, помещенных в свежееотформованном состоянии в камеру с углекислым газом. Прирост прочности в возрасте 28 суток по сравнению с образцом не прошедшем карбонизацию составил 15,6%. Максимальный эффект обнаружен при карбонизации сырьевой смеси и свежееотформованных изделий. В возрасте 28 суток прочность составила 36,5МПа, что на 20,9% выше чем в не карбонизированных изделиях.

**Выводы:** Углекислый газ в качестве добавки в сырьевую смесь проявил свойства добавки-ускорителя твердения бетона в возрасте до 3-х суток. Прирост прочности в 1-е сутки, в сравнении с не карбонизированными образцами, составил 21,8%. Использование CO<sub>2</sub> в качестве компонента газо-воздушной смеси в камере твердения обеспечило повышенный рост прочности изделий. Минимальный показатель по водопоглощению составил 4,7%, что на 27,7% меньше этого показателя у контрольных образцов. Совместное использование карбонизации бетонной смеси и свежееотформованного изделия приводит к увеличению итоговой прочности бетона в возрасте 28 суток с 30,2 МПа до 36,5 МПа, при стабильно растущей кинетике набора прочности.

**Ключевые слова:** углекислый газ, карбонизация бетонной смеси, карбонизация свежееотформованного изделия, кинетика набора прочности, бетонная смесь, тротуарная плитка.

### ВВЕДЕНИЕ

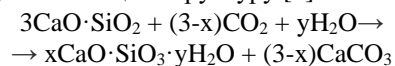
По данным многочисленных исследований, глобальное изменение климата на Земле связано с антропогенной деятельностью человека. С каждым десятилетием уровень концентрации углекислого газа в атмосфере увеличивается. Этот неконденсируемый парниковый газ ученые относят к самым сильным по воздействию на климат факторам. В связи с этим, актуальной проблемой является снижение выбросов углекислого газа в атмосферу [1]. Одним из эффективных путей утилизации выбросов углекислого газа может стать его использование в многотоннажном производстве строительных материалов, например, для карбонизации бетонных изделий.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

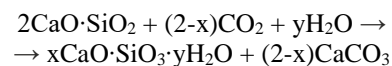
В последнее время появилось много исследований по использованию углекислого газа в производстве цементного бетона [2-4,7,10].

Уже сегодня существуют промышленные примеры эффективного использования углекислого газа в качестве добавки-ускорителя набора прочности при производстве товарного бетона, так называемая ускоренная (ранняя) карбонизация [2].

В результате гидратации клинкерных минералов в присутствии CO<sub>2</sub> образуются гидраты силиката кальция (C-S-H) и наноразмерный карбонат кальция CaCO<sub>3</sub>, уплотняющий структуру [5].



(1)



(2)

К этой же технологии относят выдержку готовых бетонных изделий в камерах насыщенных углекислым газом при определенной концентрации и давлении [4]. В работе [5] расчетно-теоретическими методами обоснован физико-химический процесс прочтения структуры бетона при карбонатном твердении. Исследовав карбонатное твердение образцов из бетонного лома, авторами установлено повышение прочности изделий в 2-3 раза по сравнению с гидратационным твердением.

В работе при исследовании режимов принудительной карбонизации известково-известняковых материалов показана эффективность умеренной подачи  $\text{CO}_2$  по сравнению с интенсивным способом карбонизации [6].

Исследование влияния предварительной гидратации перед началом карбонизации [3] показало что масса  $\text{CO}_2$ , поглощённого свежесформованным изделием уменьшается с увеличением сроков предварительной гидратации. Поэтому на ранних стадиях твердения образцы имеют менее высокую прочность. Однако в возрасте 28 суток прочность изменяется. Так установлено, что образцы с предварительной гидратацией в течении 71 часа достигают прочности 21,5 МПа, а образцы без предварительной гидратации — всего 15,1 МПа [12, 13].

При исследовании свойств цементных растворов, карбонизированных углекислым газом, растворенным в воде, установлено, что их прочность в течение 1 суток на 6% выше, чем у не карбонизированных цементных паст. Эффективность карбонизации цементной суспензии, подтверждена исследованиями, результаты которых приведены в работе [11].

В статье [8] приведены данные по ускоренной карбонизации доломитной извести и доменных шлаков. Результаты по эксплуатации бетонов, в условиях повышенной влажности, изготовленных с применением ускоренной карбонизации, изложены в работе [10].

Значительный интерес исследователей к вопросам карбонизации строительных материалов и результаты полученные ими, свидетельствуют об эффективности использования углекислого газа для повышения физико-механических свойств изделий. На наш взгляд вопросы изучения процессов карбонизации при изготовлении мелкоштучных бетонных изделий в производственных условиях требуют дополнительных экспериментов.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является исследование влияния карбонизации сырьевой смеси и свежесформованных изделий на физико-механические свойства вибропрессованной тротуарной плитки изготовленной в промышленных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо организовать производственный эксперимент по

выпуску вибропрессованной тротуарной плитки с раздельным и совместным применением карбонизации сырьевой смеси и свежесформованных изделий, а также провести лабораторные испытания по определению физико-механических характеристик изделий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве сырьевых материалов использовали шлакопортландцемент ЦЕМ П/А– Ш 42,5Н ООО “Бахчисарайский цементный завод”, щебень фракции 3-8 мм месторождения Пятихатки (Крым), песок Мкр=1,8 Зуйского месторождения (Крым), песок из отсевов дробления месторождения Пятихатки (Крым) Мкр = 2,9 и комплексная химическая добавка Мурансан БВА – 19, В/Ц – 0,4.

Из указанных сырьевых компонентов для исследования изготавливали по экспериментальной заводской рецептуре тротуарную плитку формы Б2П6 класса В25 (рис 1) методом вибропрессования на действующем предприятии ООО “Актив Групп”.



Рис. 1. Тротуарная плитка Б2П6  
Fig. 1. Paving slabs B2P6

Добавление газообразной  $\text{CO}_2$  в бетонную смесь производилось на этапе приготовления смеси в планетарном смесителе. Подача газа осуществлялась по резиновому шлангу, который с одной стороны был закреплен в смотровом проеме смесителя (в верхней его части), а с другой стороны соединен непосредственно с редуктором стального баллона с  $\text{CO}_2$ . Выбранная дозировка газа – 0,6% от массы цемента. Контроль за массой углекислого газа, поступающей в смеситель проводился с помощью напольных весов, на которых был установлен баллон. Рабочее давление редуктора (до 0,6 МПа) позволило обеспечить подачу необходимого объема  $\text{CO}_2$  за время 90с.

Карбонизация тротуарной плитки осуществлялась в камере набора прочности в среде углекислого газа при его концентрации, составляющей 50% от объема камеры, т.е., без создания предварительного разряжения. Длительность подачи газа – 2 часа. Время начала подачи углекислого газа – 1 час после формовки. Контроль за концентрацией  $\text{CO}_2$  производился с помощью регулятора расхода на стальном баллоне с  $\text{CO}_2$ . Для дополнительного контроля за расходом газа баллон был установлен на напольные весы.

В основной камере твердения располагался 3-х этажный стеллаж консольного типа, позволяющий размещать на нем 3 технологических поддона со свежееотформованной плиткой по 30 шт в каждом ряду (рис2). После установки в него экспериментальных образцов стеллаж герметично упаковывали стрейч-пленкой в несколько слоев. При обмотке пленкой было предусмотрено пространство между стенками и поддонами для пропуска газа сверху-вниз. Объем замкнутого пространства составил ориентировочно 1,2м<sup>3</sup>. Подача газа осуществлялась по резиновому шлангу, закрепленному в верхней части стеллажа.



Рис. 2. Стеллаж консольного типа с размещенной на ней тротуарной плиткой

Fig. 2.A cantilever rack with paving slabs placed on it

Дополнительно изготовлена экспериментальная партия тротуарной плитки Б2П6 В-25 с сульфатостойким цементом в качестве вяжущего без карбонизации.

В табл.1 приведена расшифровка маркировки экспериментальных образцов.

Оценку эффективности использования ускоренной карбонизации осуществляли после определения по стандартным методикам прочности тротуарной плитки при сжатии  $R_{сж}$ , МПа в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 суток, средней плотности  $\rho_0$ , г/см<sup>3</sup> и водопоглощению  $W_M$ , % в возрасте 28 суток. Итоговые значения указанных физико-механических характеристик получали путем усреднения трех результатов испытаний на каждый вид образца.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Данные физико-механических характеристик всех образцов, полученных опытным путем сведены в табл.2. Аналитический анализ кинетики набора прочности образцов без карбонизации №№: 1, 6 и с карбонизацией №№: 2, 3, 4, 5 относительно контрольного образца КО в процентном отношении представлены в табл.3.

Таблица 1. Правила маркировки образцов

Table. 1.Rulesforlabelingsamples

Обозначение:	ШПЦ	20	40	0,6	50
Расшифровка:	вид цемента	температура в камере ТВО, °С	влажность в камере ТВО, %	массовая доля CO <sub>2</sub> от массы вяжущего, %	концентрация CO <sub>2</sub> в камере ТВО, %

Таблица2.Кинетика наборапрочности, плотность и водопоглощениеобразцов

Table.2. Kinetics of strength development, density, and water absorption of samples

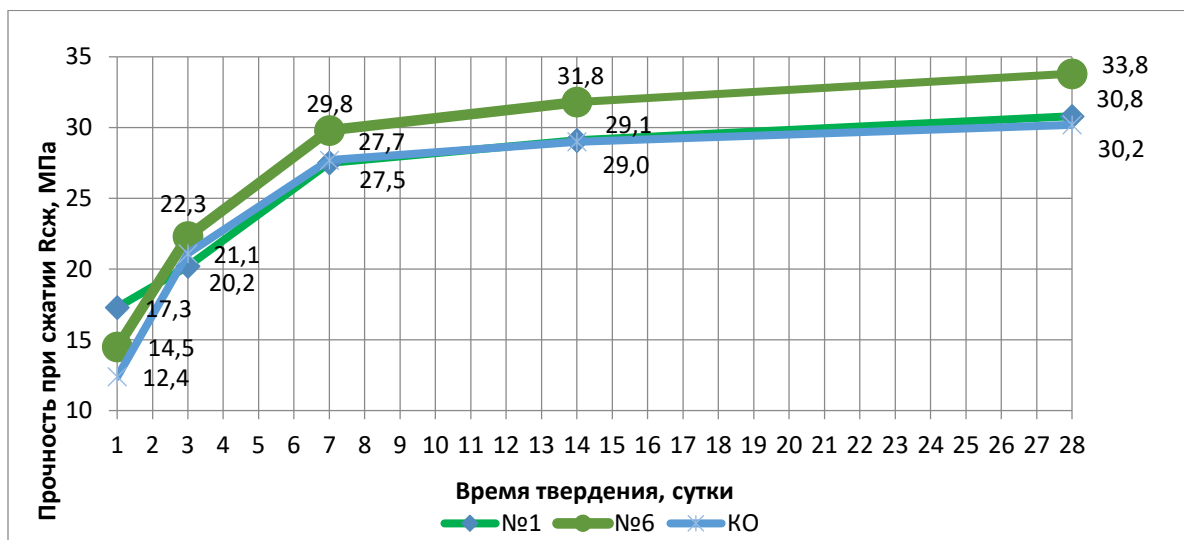
Физико-механические характеристики образцов полученные при испытаниях								
№п/п	Образец	Показатель	Ед.изм	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
КО	ШПЦ-20-40-0-0	$R_{сж}$	МПа	12.4	21.1	27.7	29.0	30.2
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,203	2,212	2,227	2,204	2,209
		$W_M$	%	-	-	-	-	6.5
1	ШПЦ-40-60-0-0	$R_{сж}$	МПа	17.3	20.2	27.5	29.1	30.8
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,211	2,238	2,217	2,225	2,212
		$W_M$	%	-	-	-	-	5.9
2	ШПЦ-20-40-0,6-0	$R_{сж}$	МПа	15.1	22.6	24.8	27.2	29.7
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,211	2,216	2,204	2,214	2,201
		$W_M$	%	-	-	-	-	5.9
3	ШПЦ-20-40-0-50	$R_{сж}$	МПа	16.3	24.1	32.2	31.8	34.9
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,211	2,205	2,218	2,205	2,213
		$W_M$	%	-	-	-	-	4.7
4	ШПЦ-20-40-0,6-50	$R_{сж}$	МПа	17.6	25.1	26.4	29.8	31.9
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,229	2,233	2,220	2,247	2,245
		$W_M$	%	-	-	-	-	5.4
5	ШПЦ-20-40-0,6-50	$R_{сж}$	МПа	18.1	26.5	29.5	32.1	36.5
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,234	2,230	2,217	2,215	2,225
		$W_M$	%	-	-	-	-	4.8
6	СС-40-60-0-0	$R_{сж}$	МПа	14.5	22.3	29.8	31.8	33.8
		$\rho_0$	г/см <sup>3</sup>	2,221	2,229	2,227	2,224	2,235
		$W_M$	%	-	-	-	-	5.8

Среди не карбонизированных изделий максимальную прочность в возрасте 28 суток показал образец с сульфатостойким цементом (рис 3). Прирост прочности составил 11,9% по отношению к КО, достигнув 33,8МПа. Более высокая температура и влажность в камере ТВО обеспечили активную реакцию гидратации и большую прочность на протяжении всего времени твердения. При использовании шлакопортландцемента рекомендуемая температура изотермической выдержки составляет

60°C [13]. При увеличении температуры в камере с 20°C до 40°C и влажности с 40% до 60% образец №1 показал ускоренное твердение в 1-е сутки. Однако, после окончания выдержки в камере ТВО, кинетика набора прочности образца №1 на протяжении всего срока твердения практически не отличалась от образца КО. Следует, также, отметить улучшенные показатели водопоглощения у образцов №1 и №6 по отношению к КО.

**Таблица 3.** Набор прочности, относительно контрольного образца КО  
**Table.3.** Strength development relative to the control sample CS

Кинетика набора прочности относительно КО, %						
№ п/п	Образец	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	ШПЦ-40-60-0-0	39.5	-4.3	-0.7	0.3	2.0
2	ШПЦ-20-40-0,6-0	21.8	7.1	-10.5	-6.2	-1.7
3	ШПЦ-20-40-0-50	31.5	14.2	16,2	9.7	15.6
4	ШПЦ-20-40-0,6-50	41.9	19.0	-4.7	2.8	5.6
5	ШПЦ-20-40-0,6-50	46.0	25.6	6.5	10.7	20.9
6	СС-40-60-0-0	16.9	5.7	7.6	9.7	11.9



**Рис. 3.** Кинетика набора прочности не карбонизированных образцов: КО, №1, №6  
**Fig. 3.** Kinetics of strength development of non-carbonated samples: CS, №1, №6

Образец №2 с карбонизацией бетонной смеси, единственный, набравший меньшую прочность, чем КО в возрасте 28 суток - 29,7 МПа. Разница составила 1,7% (рис.4). Однако стоит отметить меньшее водопоглощение на 0,6% и более активный процесс набора прочности в ранний срок твердения. Углекислый газ, введенный в бетонную смесь, проявил себя как ускоритель твердения в течении 3-х суток.

Все изделия, помещенные в герметичную камеру с углекислым газом отличаются более активным набором прочности практически весь период твердения (рис.5). Их прочность в возрасте 28 суток выше чем у КО: №3 – 34,9МПа (+15,6%), №4 – 31,9МПа (+5,6%), №5 – 36,5МПа (+20,9%). Положительный эффект от одновременной карбонизации смеси и свежееотформованного

изделия зафиксирован в образцах №4 и №5 в возрасте до 3-х суток. Однако у образца №4 уже к 7 суткам прочность падает, что объясняется снижением поглощения CO<sub>2</sub> из-за неравномерного распределения газа в герметичной камере. Через образцы №5 (3-й этаж) проходил весь поток CO<sub>2</sub>, поскольку точка ввода располагалась в верхней части камеры. Это объясняет более высокую прочность у изделий №5. Плотность углекислого газа в 1,5 раза больше чем у воздуха, поэтому весь газ, который не был поглощен образцами №4, 5 осел в самой нижней части. В результате – образец №3 без карбонизации смеси практически набрал такую же прочность, как и образец с карбонизацией смеси и свежееотформованного изделия в возрасте 28 суток.

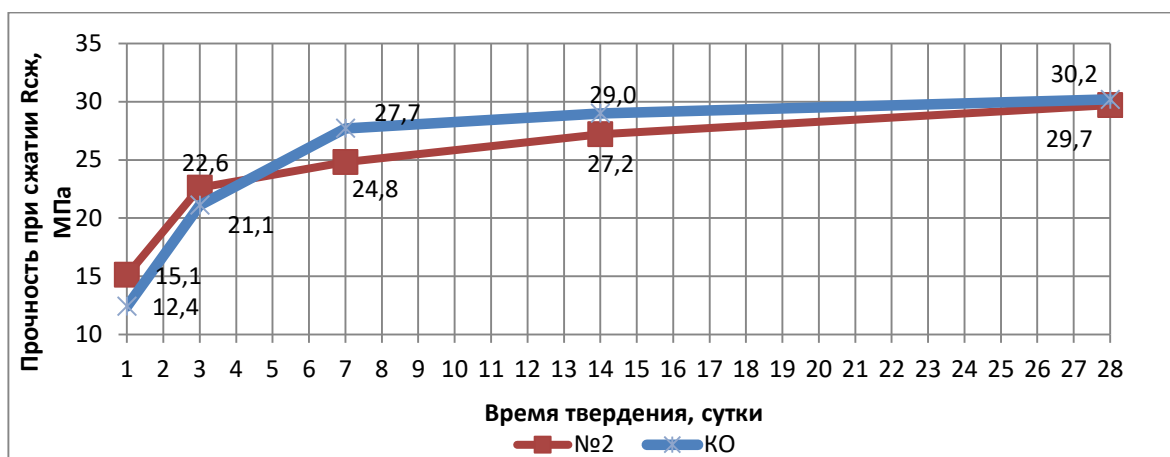


Рис.4. Кинетика набора прочности карбонизированного образца №6

Fig. 4. Kinetics of strength development of carbonated sample No. 6

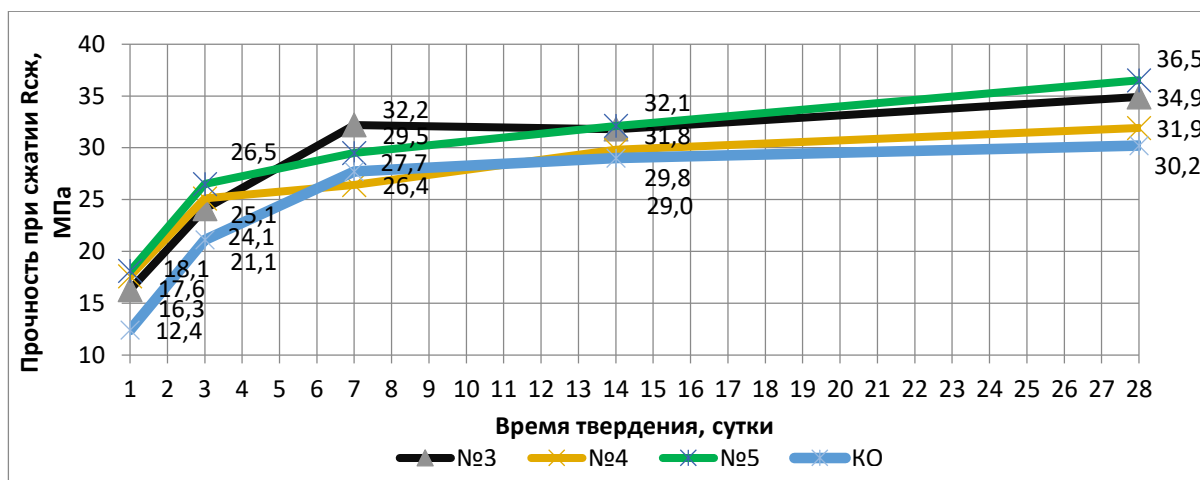


Рис. 5. Кинетика набора прочности образцов №№ 3, 4, 5, карбонизированных в камере с содержанием 50% CO<sub>2</sub>

Fig. 5. Kinetics of strength development of samples No. 3, 4, 5, carbonated in a chamber with 50% CO<sub>2</sub> content

Лучшие показатели водопоглощения наблюдаются у образцов с карбонизацией свежеотформованных изделий, что объясняется образованием CaCO<sub>3</sub> в парах, выходящих на поверхность изделия.

## ВЫВОДЫ

1. Использование углекислого газа в качестве добавки в сырьевую смесь приводит к ускоренному набору прочности в ранние сроки твердения бетона (до 3х суток). При этом параметры ТВО в камерах набора прочности снижены по отношению к требуемым - температура с 60<sup>0</sup>С до 20<sup>0</sup>С и влажность с 90% до 40%. Использование CO<sub>2</sub> в качестве компонента газо-воздушной смеси в герметичной камере набора прочности готовой продукции, в первые 2 часа ТВО приводит к увеличению прочности бетона в возрасте 28 суток с 30,2 МПа до 36,5 МПа при стабильной кинетике набора прочности и снижению водопоглощения до 4,7%, что на 27,7% меньше показателя у КО.

2. Совместное использование карбонизации бетонной смеси и свежеотформованного изделия приводит к увеличению прочности бетона в возрасте 28 суток на 20,9% при стабильно повышенной кинетике набора прочности. Также

отмечается более активное созревание бетона в возрасте до 3-х суток, по сравнению с использованием лишь карбонизации смеси.

3. Оценивая производственный эксперимент, можно утверждать об эффективности совместного применения карбонизации сырьевой смеси и свежеотформованного изделия по сравнению с её отдельным использованием. Перспективным направлением дальнейших исследований является создание модели управления физико-механическими свойствами бетона в зависимости от параметров карбонизации сырьевой смеси в смесителе и свежеотформованного изделия в камере набора прочности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любомирский Н.В. Научно – технологические принципы утилизации углекислого газа в биопозитивные строительные материалы / Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2016. - № 4 (16). – с. 39 – 49.

2. Монкман С. Использование углекислого газа в качестве добавки-ускорителя / С. Монкман // Цемент и его применение. – 2017, №1. - С.32-42.

3. Berger R.L. Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon-dioxide treatment // *Nature: Physical Sci.* – 1972, Vol. 240. - P. 16—18.

4. Рузавин А.А. Применение метода ускоренной карбонизации в технологии бетонного производства /А.А. Рузавин// Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. - №3. – С. 72–75.

5. Корчунов И.В. Использование бетонолома для производства мелкоштучных изделий карбонатного твердения /И.В. Корчунов // Цемент и его применение. – 2023. - №4. –С.26-35.

6. Любомирский Н.В. Исследование влияния режимов принудительного карбонатного твердения на свойства материалов на основе известково-известняковых композиций полусухого прессования /Н.В. Любомирский //Строительные материалы. -2017. -№8. - С. 7-12.

7. Lippiatt N. Combining hydration and carbonation of cement using super-saturated aqueous CO<sub>2</sub> solution // *Construction and Building Materials.* -2019, Vol. 229. - P. 11-25.

8. Бахтина Т.А. Получение строительных материалов на основе строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации /Т.А. Бахтина// Вестник МГСУ. -2020. -№ 1. - С. 43-57.

9. Романенко И.И. Ускоренная карбонизация формовок из сталеплавильных шлаков с целью получения изделий строительного назначения /И.И. Романенко //Дневник науки. -2023. - № 10. –С. 15-21.

10. Гильмутдинов Т.З. Результаты исследований по ускоренной карбонизации бетона и цементного камня во влажных условиях эксплуатации /Т.З. Гильмутдинов //Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. -2016. -№ 1 (35). - С. 155-164.

11. Фу Х. Хранение CO<sub>2</sub> при укреплении бетона путем карбонизации его цемента в суспензии /Х. Фу // Коммуникационные материалы. -2024.- №5. – P. 109.

12. Федоров П.А. Особенности ускоренной карбонизации бетонов на основе щелочно-щелочноземельных вяжущих /П.А. Федоров // Строительные материалы. 2024. -№ 11. - С. 40–47.

13. Иванов А.В. Тротуарная плитка на основе композиционного шлако-цементного вяжущего: диссертация канд. техн. наук: 05.23.05 / Иванов Антон Владимирович - Белгород, 2011. - 151 с.

## REFERENCES

1. Lyubomirsky N.V. Scientific and technological principles of carbon dioxide utilization in biopositive building materials / N.V. Lyubomirsky, S.I. Fedorkin // *Biospheric compatibility: man, region, technology.* – 2016. - № 4 (16). – pp. 39-49.

2. Monkman S. The use of carbon dioxide as an accelerator additive / S. Monkman // *Cement and its application.* – 2017, No. 1. - pp.32-42.

3. Berger R.L. Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon-dioxide treatment // *Nature: Physical Sci.* – 1972, Vol. 240. - P. 16-18.

4. Ruzavin A.A. Application of the accelerated carbonation method in concrete production technology / A.A. Ruzavin // *Bulletin of SUSU. The series "Construction and Architecture".* – 2017. - No. 3. – С. 72-75.

5. Korchunov I.V. The use of a concrete breaker for the production of small-piece products of carbonate hardening / I.V. Korchunov // *Cement and its application.* – 2023. - No. 4. –pp.26-35.

6. Lyubomirsky N.V. Investigation of the effect of forced carbonate hardening modes on the properties of materials based on lime-limestone compositions of semi-dry pressing / N.V. Lyubomirsky // *Building materials.* -2017. - No. 8. - pp. 7-12.

7. Lippiatt N. Combining hydration and carbonation of cement using super-saturated aqueous CO<sub>2</sub> solution // *Construction and Building Materials.* - 2019, Vol. 229. - P. 11-25.

8. Bakhtina T.A. Obtaining building materials based on dolomite lime-based accelerated hardening due to forced carbonation/ T.A. Bakhtina // *Bulletin of MGSU.* -2020. - No. 1. - pp. 43-57.

9. Romanenko I.I. Accelerated carbonation of molds from steelmaking slags in order to obtain construction products / I.I. Romanenko // *Diary of science.* -2023. - No. 10. –pp. 15-21.

10. Gilmutdinov T.Z. Research results on accelerated carbonation of concrete and cement stone in wet conditions / T.Z. Gilmutdinov // *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering.* -2016. - № 1 (35). - Pp. 155-164.

11. Fu X. CO<sub>2</sub> storage during concrete reinforcement by carbonization of its cement in suspension / X. Fu // *Communication Materials.* -2024.- No. 5. – P. 109.

12. Fedorov P.A. Features of accelerated carbonation of concretes based on alkaline-alkaline earth binders / P.A. Fedorov // *Building Materials.* 2024. - No. 11. - pp. 40-47.

13. Ivanov A.V. Paving slabs based on composite slag-cement binder: dissertation of Candidate of Technical Sciences: 05.23.05 / Ivanov Anton Vladimirovich - Belgorod, 2011. 151 p.

## CARBONATION OF THE RAW MATERIAL MIXTURE AND FRESHLY MOLDED PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF CONCRETE VIBROPRESSED PAVING SLABS

Borodin<sup>1</sup> S.S., Fedorkin<sup>2</sup> S.I., Makarova<sup>3</sup> E.S.

<sup>1</sup>Aktiv Group LLC, 297540, Republic of Crimea, Simferopol district, Rodnikovo village, ter.  
Complex of buildings and structures 1,  
e-mail: sborodin@ag-ru.com

<sup>2,3</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Academy of Construction and Architecture,  
Address: 181 Kievskaya St., Simferopol, 295493,  
e-mail: kfu.fedorkin@mail.ru

**Annotation:** This article presents the results of factory tests to determine the effectiveness of carbonation of a raw mixture and freshly molded products in the production of vibropressed paving slabs. During carbonation of the raw material mixture, carbon dioxide is used as an additive to concrete as a percentage of the binder weight. The carbonation of freshly molded products was carried out in a gas-air mixture with a certain concentration of CO<sub>2</sub>. The kinetics of strength gain of finished products over the course of 28 days, as well as density and water absorption indicators, were determined.

**Subject of research:** the effect of carbonation of the raw material mixture and freshly molded products on the physical and mechanical properties of vibropressed paving slabs.

**Materials and methods:** rigid concrete mix using CEM II/A-Sh 42.5N slag-portland cement as a binder. The mixture is prepared in an industrial planetary mixer with a volume of 1.1 m<sup>3</sup>. Paving slabs are made on a vibro-impact industrial press with a molding field of 1300\*900 and a disturbing force of 140kN. The supply of the required amount of CO<sub>2</sub> to the mixer and to the strength-building chamber was quantitatively controlled using floor scales. Compressive strength tests were carried out in the laboratory of the enterprise using a concrete press IP-1500 according to GOST 28570-19. The water absorption of the samples was determined in accordance with GOST 12730.3-2020.

**Results:** during production tests, an increase in the strength of vibropressed concrete products placed in a freshly molded state in a carbon dioxide chamber was revealed. The increase in strength at the age of 28 days compared to the sample that had not undergone carbonation was 15.6%. The maximum effect was found during carbonation of the raw material mixture and freshly molded products. At the age of 28 days, the strength was 36.5 MPa, which is 20.9% higher than in non-carbonized products.

**Conclusions:** Carbon dioxide as an additive to the raw material mixture showed the properties of an accelerator additive for concrete hardening at the age of up to 3 days. The increase in strength on day 1, compared with non-carbonized samples, was 21.8%. The use of CO<sub>2</sub> as a component of the gas-air mixture in the hardening chamber provided an increased increase in the strength of the products. The minimum water absorption rate was 4.7%, which is 27.7% less than that of the control samples. The combined use of carbonation of a concrete mixture and a freshly molded product leads to an increase in the final strength of concrete at the age of 28 days from 30.2 MPa to 36.5 MPa, with a steadily increasing kinetics of strength gain.

**Key words:** carbon dioxide, carbonation of concrete mix, carbonation of freshly molded product, kinetics of strength gain, concrete mix, paving slabs.



## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗЕРКАЛЬНОГО КУБА

Дворецкий А.Т.<sup>1</sup>, Завалий А.А.<sup>2</sup>, Шубин И. Л.<sup>3</sup><sup>1,2</sup>Крымский федеральный университет им. В.А. Вернадского, г. Симферополь<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики, г. МоскваE-mail: <sup>1</sup>erces\_crimea@mail.ru, <sup>2</sup>zavalym@mail.ru, <sup>3</sup>shuig@mail.ru

**Аннотация.** Расчётно-аналитически и экспериментально исследовано тепловое состояние поверхностей архитектурного объекта «зеркальный куб», представляющего собой объём размерами 20x20x20м, выполненный в массиве грунта так, что его верхняя грань представляет собой отверстие на поверхности грунта, боковые стены «куба» оформлены как зеркально отражающие поверхности, а дно куба представляет собой бетонированную площадку. Верхняя грань куба открыта для прямого солнечного излучения и воздухообмена объёма куба с окружающей атмосферой, а зеркально отражающие боковые поверхности «куба» представляют собой многослойные панели, закреплённые на его бетонных боковых поверхностях. Архитектурный объект расположен на южном побережье Крыма в районе посёлка Форос.

**Предмет исследований:** Предметом исследований являются тепловой режим пространств перед фасадами, которые отражают солнечную энергию.

**Материалы и методы:** В статье предлагаются определение температурного режима работы зеркальных панелей.

**Результаты:** Установлено, что максимальные значения температуры на поверхности стекла зеркальных стенок «куба» могут достигать кратковременно 200°C. Вследствие прямого и отражённого солнечного излучения в наихудших температурных условиях находятся нижние слои боковых граней «куба», а наиболее нагретой является бетонная поверхность пола. Локальный перегрев поверхностей стекла нижних ярусов стенок «куба» является основной причиной нарушения целостности клеевого слоя зеркальных панелей стенок.

**Выводы:** В наиболее сложных условиях дополнительно к конвекции находятся нижние слои граней «куба», т.к. на них приходится наибольшее количество прямой и отражённой от соседних граней тепловой солнечной энергии. Наиболее нагретой является бетонная поверхность пола, т.к. воспринимает прямое и три отражённых излучения и обладает наименьшей отражающей способностью.

**Ключевые слова:** солнечное излучение, отражённое излучение, зеркально отражающая поверхность, конвективный тепловой поток, концентрация теплового излучения, архитектурный объект.

## ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2015 года небоскреб Walkie Talkie в Лондоне с большим отрывом от конкурентов победил в антиконкурсе Carbuncle Cup как худшее новое британское здание.

Вызывает удивление, что создатели столь дорогого здания, как WalkieTalkie (рис.1, а), строительство которого оценивается в 200 млн фунтов стерлингов, не смогли на стадии моделирования и тестирования рассчитать эффект отражения. Удивляет также то, что до сих пор так много проектировщиков рассматривает стекло как некий «футуристический материал», концептуально «застряв в 1950-х» и не обращают внимания на негативные явления, связанные с отражениями от стеклянных фасадов [1].

Проблемы с WalkieTalkie начались в первых числах сентября 2013 года, когда южная сторона здания была почти полностью остеклена. Вогнутые стекла стали концентрировать и отражать свет, что в солнечные дни приводило к повреждению движимого и недвижимого имущества в окрестностях башни.

Эта архитектурная вогнутость ловит и так мощно отражает солнечные лучи, что температура в концентрированном луче достигает рекордных 69,8 градуса по Цельсию и можно жарить яичницу (рис. 1 б). Это абсолютный рекорд в естественных условиях — сто лет назад в Долине Смерти была

зафиксирована максимальная температура в 56,7 градуса.

Похожий отрицательный эффект наблюдается в Винном парке в Форосе в сооружении под названием «зеркальный куб».

Тепловое состояние поверхностей «зеркального куба» определяется его конструкцией (форма, геометрические размеры, взаимное положение конструкции «куба» и окружающих его объектов), потоком теплового излучения Солнца и конвективными потоками теплоты от стенок «куба» к окружающему их атмосферному воздуху.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Геометрия отражений от кривых поверхностей с источником света в собственной точке рассмотрены в работах профессора Подгорного А.Л. и его учеников. Двухпараметрическое множество отраженных от поверхности концентратора лучей заменяется однопараметрическим множеством поверхностей лучей, отраженных от плоских сечений поверхности концентратора. Такое расслоение конгруэнции отражённых лучей позволило исследовать особенности поверхностей отражённых лучей и разработать теорию квазифокальных точек и квазифокальных линий [2,3].



а)



б)

**Рис. 1** а), б). Небоскреб Walkie Talkie в Лондоне.

<https://www.ixbt.com/live/travel/neboskreb-kotoryy-plavit-avtomobili-i-sbivaet-lyudey-s-nog-istoriya-proekta-walkie-talkie.html>

**Fig.1** a),b). Walkie Talkie skyscraper in London.

<https://www.ixbt.com/live/travel/neboskreb-kotoryy-plavit-avtomobili-i-sbivaet-lyudey-s-nog-istoriya-proekta-walkie-talkie.html>

Учёт условий облучения зданий важно для анализа теплообменных процессов в стенах, в том числе в прозрачных ограждающих конструкциях, для освещения и инсоляции помещений, поступление солнечного тепла через остекление окон и устройств для нагрева воздуха, регулирование его солнцезащитными устройствами [4].

Геометрическое моделирование показало, что на полу зеркального зала в некоторых зонах происходит сложение трёх отражённых от граней потоков солнечной радиации и прямого потока солнечной радиации [5]. Тепловые снимки, выполненные тепловизором «testo 882», подтвердили достоверность предложенной геометрической модели.

Тепловое равновесие поверхностей «куба» определяется равенством источников теплоты и стоков теплоты. Источником теплоты служит солнечное излучение, а стоком теплоты – конвективные потоки теплоты от стенок к окружающему их воздуху. При этом следует учитывать, что тепловое состояние поверхностей «куба» является динамическим, то есть непостоянным во времени. В определённые часы суток температура воздуха в объёме «куба» может быть выше температуры стенок за счёт нагрева дна куба. В дневное солнечное время температура

стенок может быть существенно выше температуры воздуха.

### Теплотехнические расчеты элементов зеркальных панелей.

Оценки конвективных тепловых потоков выполнены для предполагаемых диапазонов изменения величины коэффициента конвективной теплоотдачи для вертикальной стенки в условиях естественной конвекции. Этот диапазон по данным различных авторов составляет от 5 до 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [6, 7, 8, 9].

Стоки теплоты от стенок «куба» теплопроводностью следует исключить, так как стенки крепятся к стенам фундамента «куба» стержнями, площадь сечения которых пренебрежимо мала по сравнению с площадью поверхности стенок «куба». Между стенками «куба» и стенами фундамента имеется воздушная замкнутая полость, служащая почти идеальным теплоизолятором.

Таким образом, тепловой баланс стенок «куба» определяется выражением (2.2):

$$q_1 + q_2 = 0, \quad (2.2)$$

где  $q_1$  – поток теплового солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_2$  – конвективный тепловой поток от стенок «куба» в окружающую их атмосферу, Вт/м<sup>2</sup>.

В соответствии с законом Ньютона-Рихмана величина  $q_2$  равна (2.3):

$$q_2 = \alpha \cdot (t_p - t_a), \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_p$  – температура поверхности стенки куба, °С;

$t_a$  – температура атмосферного воздуха внутри «куба», °С.

Из выражений (2.2) и (2.3) следует формула для определения температуры поверхности стенки «куба» (2.4):

$$t_p = \frac{q_1}{\alpha} + t_a. \quad (2.4)$$

Вычисление температуры поверхности  $t_p$  выполним для ряда значений потока теплового солнечного излучения  $q_1$ , коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha$  и температуры атмосферы  $t_a$ .

Следует учитывать, что величина  $q_1$  включает в себя сумму всех потоков падающего на поверхность стенки «куба» теплового излучения, то есть прямого солнечного излучения и отражённого, включая однократное и многократные отражения.

Выполненное нами ранее экспериментальное определение величины потока прямого солнечного излучения на площадку, расположенную перпендикулярно потоку солнечного излучения, показало, что в середине октября в солнечный день в Симферополе

максимальное значение потока прямого солнечного излучения достигало 1750 Вт/м<sup>2</sup> при среднем значении 1017 Вт/м<sup>2</sup> в период с 13 по 16 часов местного времени.

В условиях облучения стенок «куба» величина прямого солнечного излучения существенно снижается, так как стенки не перпендикулярны направлению потока излучения, а поверхности стенок обладают отражающей способностью, составляющей до 60% от падающего потока излучения. Поэтому для дальнейших расчётов принято, что величина  $q_i$  в формуле (2.4) может изменяться от 300 до 800 Вт/м<sup>2</sup>.

Как следует из приведенных выше рисунков, дно куба облучается прямым солнечным излучением с 9-00 до 16-00 по местному времени. Доля облучаемой площади дна  $S_d$  достигает в 12-00 величины 0,57.

Величины  $q_n$  и  $S_d$  приведены в таблице 1.

В расчёте принимаем, что бетонная поверхность пола является диффузно излучающим по закону Ламберта телом со степенью черноты  $\epsilon = 0,8$ . Принимаем также, что излучение осуществляется всей поверхностью пола, угол облучения боковой стенки определяем от центра пола на центр выделенной на стенке полосы по высоте в направлении, перпендикулярном поверхности стенки (рис. 2.).

Максимальное значение температуры поверхности пола принимаем равным  $t_{max} = 220$  °С по результату экспериментального определения факта плавления пенополиуретановой теплоизоляции на дне куба в июле 2020 года. Максимальное значение температуры пола соотносим с максимальными значениями  $q_{max}$  и  $S_{dmax}$  (табл. 1), значения температуры в другие моменты времени определяем как прямо пропорционально зависящие от  $q_n$  и  $S_d$ .

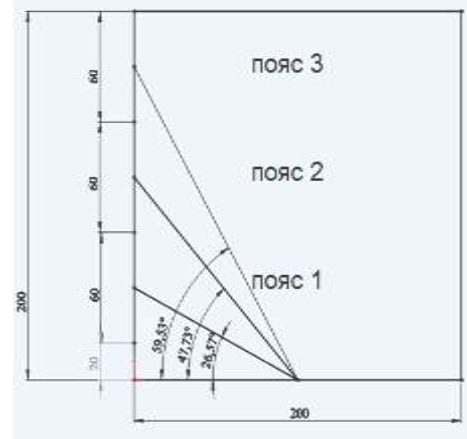
**Таблица 1.** Удельная мощность теплового излучения  $q_n$  и доля облучаемой Солнцем площади дна куба  $S_d$  на 12 июня

**Table 1.** Specific power of thermal radiation  $q_n$  and the proportion of the area of the cube bottom irradiated by the Sun  $S_d$  on June 12

дата 12.06					
№	Время, час	Азимут, град.	Высота, град.	$q_n$	$S_d$
		$\alpha$	$\gamma$	Вт/м <sup>2</sup>	%
1	6	65	9		
2	7	75	20		
3	8	82	30		
4	9	92	40	700	2,5
5	10	105	50	1000	17,5
6	11	120	60	1400	33,8
7	12	144	66	1500	57
8	13	190	67	1550	52,5
9	14	216	63	1600	42,5
10	15	240	55	1400	28
11	16	255	45	1000	9
12	17	268	34		
13	19	285	24		

Такая оценка даёт заниженные значения теплового потока для прилежащих к облучаемой поверхности дна стенок и завышенные – для удалённых стенок.

Для определения теплового потока излучения от дна используем закон Стефана-Больцмана, в котором температуру стенки куба примем равной температуре этой стенки, определённой без учёта искомого потока от дна куба.



**Рис. 2.** Углы облучения боковых стенок дном куба  
**Fig. 2.** Irradiation angles of the side walls by the cube bottom

Расчётная формула определения суммы падающего прямого и первого отражённого от смежных стенок потоков излучения на поверхность стенки имеет вид (2.5):

$$q_0 = (1 - R) \cdot q_n \cdot \sin(\beta_n) + R \cdot q_n \cdot \sum (\sin(\beta_i) \cdot \sin(\beta_{1i})), \quad (2.5)$$

где  $q_0$  – суммарный падающий поток теплового излучения без учёта излучения дна куба, Вт/м<sup>2</sup>;

$\beta_n$  – угол падения прямого излучения на исследуемую стенку, град.;

$\beta_i$  – угол падения прямого излучения на смежную стенку, град.;

$\beta_{1i}$  – угол падения отражённого излучения от смежной стенки, град.

Температуру поверхности стенки определяем по уравнению теплового баланса потока теплового излучения и конвективного теплового потока от стенки окружающему воздуху (2.6):

$$t_p = \frac{q_0}{\alpha} + t_a \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_p$  – температура поверхности стенки куба, °С;

$t_a$  – температура атмосферного воздуха внутри «куба», °С.

Величину суммарного теплового потока излучения на j-й пояс стенки с учётом излучения дна куба определяем по формуле (2.7):

$$q_{1j} = q_0 + (1 - R) \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left[ \left( 273,15 + t_{\max} \cdot \frac{q_n \cdot S_d}{q_{n\max} \cdot S_{d\max}} \cdot \frac{S_d}{100} \right)^4 - (271,15 + t_p)^4 \right] \cdot \cos(\varphi_j), \quad (2.7)$$

где  $\varphi_j$  – угол падения теплового излучения от дна куба на пояс боковой стенки в соответствии с рисунком 2.18.

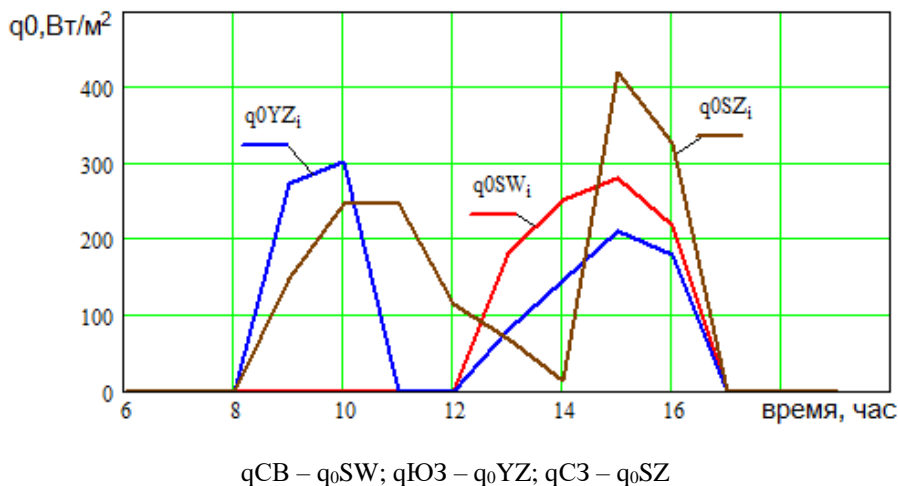
Окончательно температуру поверхности пояса стенки определяем по формуле (2.8):

$$t_{pj} = \frac{q_{1j}}{\alpha} + t_a \quad (2.8)$$

Результаты расчёта  $q_0$  по формуле (2.5) приведены в таблице 2.3. Графическое изображение данных таблицы 2 приведено на рисунке 3.

**Таблица 2.** Сумма падающего прямого и первого отражённого от смежных стенок потоков излучения на поверхности стенки куба  
**Table 2.** The sum of the incident direct and first reflected from adjacent walls radiation fluxes on the surface of the cube wall

№	время, час	qCB, Вт/м <sup>2</sup>	qЮЗ, Вт/м <sup>2</sup>	qСЗ, Вт/м <sup>2</sup>
1	6	0	0	0
2	7	0	0	0
3	8	0	0	0
4	9	0	273,72	148,38
5	10	0	300,63	246,26
6	11	0	0	245,49
7	12	0	0	114,49
8	13	181,27	79,498	68,08
9	14	250,07	146,56	13,091
10	15	280	210	420
11	16	217,86	177,98	326,78
12	17	0	0	0
13	19	0	0	0

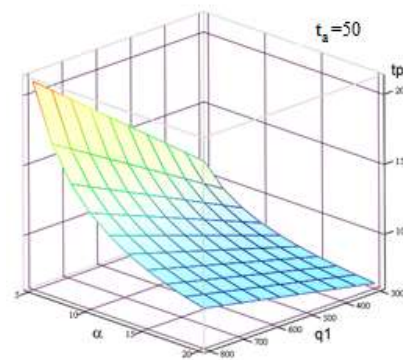


**Рис. 3** Падающий на стены поток теплового излучения  $q_0$ , рассчитанный по формуле (2.5)  
**Fig. 3.** The flux of thermal radiation  $q_0$  falling on the walls, calculated using formula (2.5)

### Определение температурного режима работы зеркальных панелей на объекте

На графике (рис. 4) приведены поверхности возможных температур поверхности стенок «куба» для принятых диапазонов величин  $\alpha$ ,  $q_1$  и величины  $t_a = 50^\circ\text{C}$ .

Как следует из графиков наиболее неблагоприятным сочетанием  $\alpha$  и  $q_1$  является низкое значение  $\alpha$  и высокое значение  $q_1$  (солнечная безветренная погода). В этих условиях температура поверхности стенки может достигать  $200^\circ\text{C}$ .



**Рис. 4.** Величина температуры стенки поверхности «куба»  
**Fig. 4.** The value of the wall temperature of the “cube” surface

Следует иметь в виду, что полученная в расчётах оценка максимального значения температуры является оценкой «сверху», так как получена для стационарного теплового состояния стенки, то есть, когда максимальное значение потока теплового излучения действует на стенку продолжительный период времени. В то время как в действительности период действия максимального теплового потока ограничен несколькими десятками минут.

Экспериментальное определение температуры поверхности стенок «куба» выполнено 12 марта 2021 года в период с 14-00 до 14-30 по местному времени.

В течение дня эксперимента была преимущественно облачная погода. Безоблачная солнечная погода установилась к 13-30. Таким образом, температурное состояние стенок и дна «куба» следует определить, как динамическое, то есть в состоянии разогрева.

Измерения выполнены тепловизором testo 882 с матрицей размером 320x240 пикселей.

Для проверки корректности показаний тепловизора выполнены тестовые измерения, в результате которых получено:

1) тепловизор регистрирует температуру поверхности стекла (рис. 5);

2) заданные в программное обеспечение тепловизора коэффициенты отражения и температура окружающей среды позволяют получать корректные значения температуры поверхности стекла с погрешностью не более 5%;

3) отражение в зеркальных поверхностях стенок «куба» излучения объектов, имеющих более высокую температуру по сравнению с температурой поверхности стенки, приводит к завышению показаний тепловизора. Величина завышения составляет примерно 20% от разницы температур более горячего объекта и отражающей поверхности. Например, если температура поверхности составляет 20°C, а температура горячего объекта 100°C, то регистрируемая тепловизором температура составляет:

$$20^{\circ}\text{C} + (100 - 20) / 5^{\circ}\text{C} = 36^{\circ}\text{C}.$$

На иллюстрациях ниже представлены диаграммы распределения температуры и фотографические изображения объектов измерения.

Расчёт температуры поверхности стенок выполнен для значений коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha = 5, 10, 15$  и  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и температуре воздуха внутри куба  $t_a = 50^{\circ}\text{C}$ .

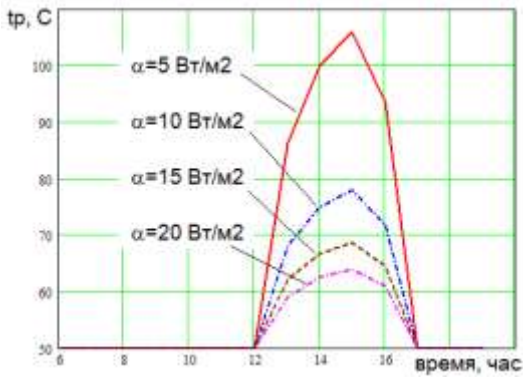
Результаты расчёта для каждой из стенок приведены в таблице 3.

Представленные в таблице 3 значения температуры поверхности стенки позволяют определить поток теплового излучения от поверхности пола на стенки по формулам (2.5) и (2.6).

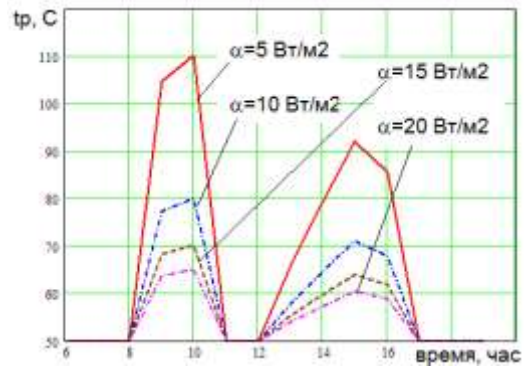
Графическое изображение результатов расчёта температуры стенок приведены на рисунке 5.

**Таблица 3.** Расчётные температуры поверхности стенок  
**Table 3.** Calculated wall surface temperatures

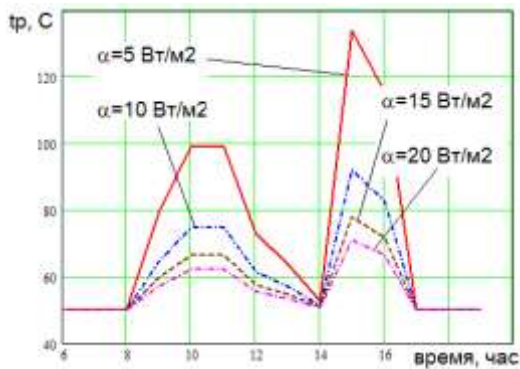
время, час	$t_{pCB}, ^{\circ}\text{C}$				$t_{pЮЗ}, ^{\circ}\text{C}$				$t_{pCЗ}, ^{\circ}\text{C}$			
	$\alpha, \text{Вт}/\text{м}^2$				$\alpha, \text{Вт}/\text{м}^2$				$\alpha, \text{Вт}/\text{м}^2$			
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
7,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
8,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
9,00	50,00	50,00	50,00	50,00	104,74	77,37	68,25	63,69	79,68	64,84	59,89	57,42
10,00	50,00	50,00	50,00	50,00	110,13	80,06	70,04	65,03	99,25	74,63	66,42	62,31
11,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	99,10	74,55	66,37	62,27
12,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	72,90	61,45	57,63	55,72
13,00	86,25	68,13	62,08	59,06	65,90	57,95	55,30	53,97	63,62	56,81	54,54	53,40
14,00	100,01	75,01	66,67	62,50	79,31	64,66	59,77	57,33	52,62	51,31	50,87	50,65
15,00	106,00	78,00	68,67	64,00	92,00	71,00	64,00	60,50	134,00	92,00	78,00	71,00
16,00	93,57	71,79	64,52	60,89	85,60	67,80	61,87	58,90	115,36	82,68	71,79	66,34
17,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
19,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00



а)



б)



в)

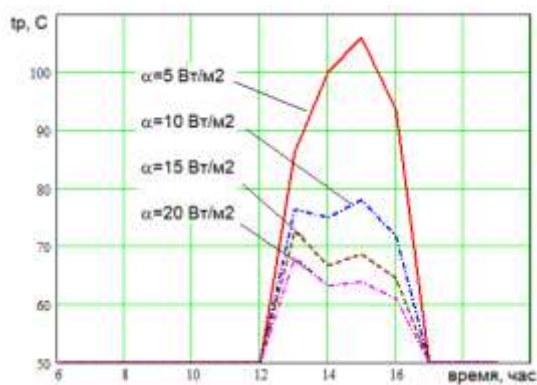
**Рис. 5.** Расчётные значения температуры  $t_p$  поверхности стенок:  
а) стенка СВ; б) стенка ЮЗ; в) стенка CЗ

**Fig. 5.** Calculated values of wall surface temperature  $t_p$ :  
a) wall CB; b) wall SW; c) wall SZ

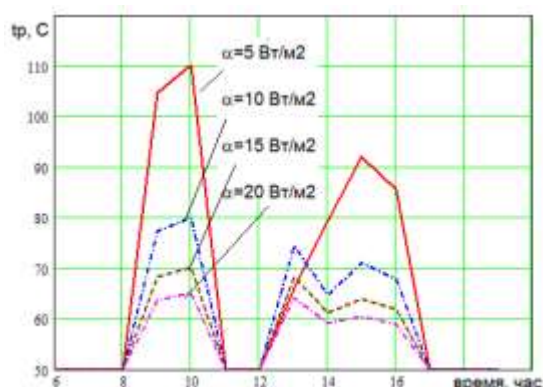
В таблице 4 и на рисунке 6 приведены расчётные значения температуры для 1-го пояса стен куба в соответствии с обозначениями на рисунке 3.

**Таблица 4** Расчётные температуры поверхности стенок 1-го пояса  
**Table 4** Calculated surface temperatures of the walls of the 1st belt

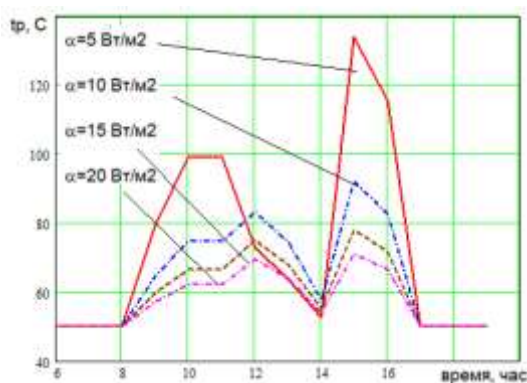
время, час	$t_{pCB}, ^\circ C$				$t_{pЮЗ}, ^\circ C$				$t_{pCЗ}, ^\circ C$			
	$\alpha, \text{Вт/м}^2$				$\alpha, \text{Вт/м}^2$				$\alpha, \text{Вт/м}^2$			
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
6,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
7,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
8,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
9,0	50,0	50,0	50,0	50,0	104,7	77,4	68,2	63,7	79,7	64,8	59,9	57,4
10,0	50,0	50,0	50,0	50,0	110,1	80,1	70,0	65,0	99,3	74,6	66,4	62,3
11,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	99,1	74,5	66,4	62,3
12,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	72,9	83,2	75,1	69,5
13,0	86,3	76,3	72,6	68,1	65,9	74,5	68,3	64,2	63,6	74,2	67,8	63,7
14,0	100,0	75,0	66,7	63,1	79,3	64,7	61,1	59,2	52,6	57,5	55,3	54,1
15,0	106,0	78,0	68,7	64,0	92,0	71,0	64,0	60,5	134,0	92,0	78,0	71,0
16,0	93,6	71,8	64,5	60,9	85,6	67,8	61,9	58,9	115,4	82,7	71,8	66,3
17,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
19,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0



а)



б)



в)

Заметное влияние тепловое излучение пола оказывает на нижний 1-й пояс стен в период с 12 до 14 часов местного времени, о чём свидетельствует сравнение диаграмм на рисунках 5 и 6.

## ВЫВОДЫ

1. Для принятых диапазонов изменения теплового потока солнечного излучения и коэффициентов естественной конвективной теплоотдачи максимальные значения температуры на поверхности стекла стенок «куба» может достигать кратковременных значений 200°C.

2. В наиболее угнетённых условиях дополнительно к конвекции находятся нижние слои граней «куба», т.к. на них приходится наибольшее количество прямой и отражённой от соседних граней тепловой солнечной энергии. Наиболее нагретой является бетонная поверхность пола, т.к. воспринимает прямое и три отражённых излучения и обладает наименьшей отражающей способностью. Известно, что бетон обладает наибольшей аккумулирующей способностью после воды.

3. Таким образом, явления локального перегрева поверхностей являются основной причиной нарушения целостности клеёвого слоя зеркальной панели.

**Рис. 6.** Расчётные значения температуры поверхности стенок 1-го пояса:

а) стенка СВ; б) стенка ЮЗ; в) стенка СЗ

**Fig. 6.** Calculated values of the surface temperature of the walls of the 1st belt:

a) wall CB; b) wall SW; c) wall NW

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Интернет ресурс <https://www.ixbt.com/live/travel/neboskreb-kotoryu-plavit-avtomobili-i-sbivaet-lyudey-s-nog-istoriya-proekta-walkie-talkie.html>
- Подгорный А.Л. Поверхности отраженных лучей // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев. «Будівельник», 1975. – Вып. 20. С.13 – 16.
- Dvoretzky A.T. The special points of reflected beam surfaces // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Київ. КНУБА, 2002 – вип. 70. – С. 208-213.
- Сергейчук О.В. Геометрична комп'ютерна модель "Atmospheric Radiation" для енергоефективного будівництва// Енергосбереження в будівництві та архітектурі. - Київ:-2011 -вип. 1.- С 22-28.
- Дворецкий А.Т., Завалий А.А., Спиридонов А.В., Шубин И.Л. Оценка инсоляционного режима зеркального зала уникального здания Светотехника. №2, 2022, С. 17-21.
- Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. - 416 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. - Изд. 3-е, перараб. и доп. – М.: Энергия, 1975. - 488 с.

8. Кейс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. Пер. с англ. – М.: Энергия, 1972. - 448 с.

9. Матрыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-кнвективный теплообмен. Справочник – Минск: Наука и техника, 1982. – 400 с.

## REFERENCES

1. Internet resource <https://www.ixbt.com/live/travel/neboskreb-kotoryu-plavit-avtomobili-i-sbivaet-lyudey-s-nog-istoriya-proekta-walkie-talkie.html>.

2. Podgorny A.L. Surfaces of reflected rays // Applied geometry and engineering graphics. Kyiv. "Budivelnik", 1975. - Issue 20. Pp. 13 - 16.

3. Dvoretzky A.T. The special points of reflected beam surfaces // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Київ. КНУБА, 2002 – вип. 70. – С. 208-213.

4. Sergeychuk O.V. Geometric computer model "Atmospheric Radiation" for energy efficient living// Energy saving in everyday life and architecture. - Kiev:-2011 -vip. 1.- From 22-28.

5. Dvoretzky A.T., Zavalij A.A., Spiridonov A.V., Shubin I.L. Assessment of the insolation regime of the mirror hall of the unique building// Light&Engineering. No. 2, 2022, pp. 17-21.

6. Kutateladze S.S. Fundamentals of the Theory of Heat Transfer. – 5th ed. revised and enlarged. – М.: Atomizdat, 1979. 416 p.

7. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat Transfer. Textbook for Universities. 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow: Energiya, 1975. 488 p

8. .Case V.M. Convective heat and mass transfer. Translated from English. – Moscow: Energy, 1972. 448 p.

9. Matrynenko O.G., Sokovishin Yu.A. Free convective heat transfer. Handbook – Minsk: Science and Technology, 1982. – 400 p.

## THERMAL CONDITIONS OF THE MIRROR CUBE

Dvoretzky A.T.<sup>1</sup>, Zavalij A.A.<sup>2</sup>, Shubin I. L.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>The Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol,

<sup>3</sup>Research Institute of Building Physics, Moscow

E-mail: <sup>1</sup>erces\_crimea@mail.ru, <sup>2</sup>zavalym@mail.ru, <sup>3</sup>shuig@mail.ru

**Abstract.** The thermal state of the surfaces of the architectural object "mirror cube" was investigated by calculation, analysis and experiment. It is a volume measuring 20x20x20 m, made in a soil massif so that its upper edge is an opening on the soil surface, the side walls of the "cube" are designed as mirror-reflecting surfaces, and the bottom of the cube is a concrete platform. The upper edge of the cube is open to direct solar radiation and air exchange of the cube volume with the surrounding atmosphere, and the mirror-reflecting side surfaces of the "cube" are multilayer panels fixed to its concrete side surfaces. The architectural object is located on the southern coast of Crimea in the area of the village of Foros.

**Subject of research:** The subject of research is the thermal conditions of spaces in front of facades that reflect solar energy.

**Materials and methods:** В статье предлагаются определение температурного режима работы зеркальных панелей.

**Results:** It has been established that the maximum temperature values on the glass surface of the "cube" mirror walls can reach 200°C for a short time. Due to direct and reflected solar radiation, the lower layers of the "cube" side faces are in the worst temperature conditions, and the concrete surface of the floor is the hottest. Local overheating of the glass surfaces of the lower tiers of the "cube" walls is the main reason for the violation of the integrity of the mirror panel adhesive layer of the walls.

**Conclusions:** In addition to convection, the lower layers of the cube faces are in the most difficult conditions, since they receive the greatest amount of direct and reflected solar thermal energy from adjacent faces. The concrete floor surface is the hottest, since it receives direct and three reflected radiation and has the lowest reflectivity.

**Key words:** solar radiation, reflected radiation, mirror reflecting surface, convective heat flow, concentration of thermal radiation, architectural object.

## Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 621.311.24: 621.3.026.5

### АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КРЫМА

Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Бекиров О.С.

Физико-технический институт, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,  
Адрес: Симферополь, ул. Киевская, 181,  
e-mail: Bekirov.e.a@cfuv.ru

**Аннотация.** В статье проведено исследование работы модульных компенсаторов реактивной мощности на Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанциях. Для этого приведены измерения активной и реактивной мощностей за краткие промежутки времени: несколько часов для Мирновской ветроэлектростанции и за сутки для Пресноводненской, а также значения для каждого месяца в течение одного года. Колебания реактивной мощности при использовании компенсаторов реактивной мощности могут быть очень незначительными, в основном за счет времени коммутации, а эффективность обоснована повышением коэффициентов мощности до значений, близких к единице.

**Предмет исследования:** ветроэлектростанции. Все ветроэлектростанции как генерируют активную мощность, являющуюся функцией от скорости ветра, так и потребляют реактивную мощность. Оба этих процесса могут наблюдаться одновременно и возникает проблема, связанная с уменьшением коэффициента мощности. Конденсаторных батарей, расположенных в шкафах управления, часто недостаточно для ее решения.

**Материалы и методы:** применялись аналитический и экспериментальный методы. Измерения проводились на Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанциях.

**Результаты:** Установлено, что применение модульных компенсаторов реактивной мощности на ветроэлектростанциях позволяет практически полностью компенсировать потребление реактивной мощности.

**Выводы:** Исследования показали, что на ветроэлектростанциях необходимо устанавливать дополнительные компенсирующие устройства, чтобы увеличить коэффициент мощности до значений, близких к единице, и практически полностью перекрыть потребность в реактивной мощности как в режимах, близких к номинальному, так и при отсутствии ветра.

**Ключевые слова:** компенсатор реактивной мощности; ветроэлектростанция; осциллограмма; ветроэнергетический модуль; трансформаторная подстанция.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно большое внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии. Одним из таких источников является ветер, особенностью которого является стохастический характер изменения в течение как суток, так и всего года. Соответственно, это влияет на изменение как генерации активной мощности ветроэнергетическими установками (ВЭУ) в составе ветроэлектростанции (ВЭС), так и на потребление реактивной мощности, что объясняется использованием во многих ВЭУ асинхронных генераторов.

Перетоки реактивной мощности, в свою очередь, влияют на качество электроэнергии и на взаимодействие с общей сетью. В связи с этим могут использоваться различные способы компенсации реактивной мощности, каждый из которых будет иметь преимущества и недостатки для конкретно взятой ситуации и состава ВЭС.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Практически во всех существующих электрических сетях будут присутствовать перетоки реактивной мощности, влияющие на качество

электроэнергии [1] и на возможности коммутации потребителей и источников. Как следствие, потери мощности могут рассчитываться с помощью математических [2] или полиномиальных моделей [3]. Первые более сложные и требуют более высокой квалификации, вторые – проще и требуют меньшего количества данных.

Для ветроэлектростанций перетоки реактивной мощности могут быть существенными в зависимости от номинальных мощностей и используемых типов генераторов. В связи с этим в шкафах управления каждой ВЭУ установлены конденсаторные батареи, но не всегда их достаточно. Тем более, что и их возможности могут быть ограничены двумя ступенями. Более многоступенчатые компенсаторы намного сложнее, хотя и подтверждают свою эффективность [4]. Также для них нужно разрабатывать отдельные регуляторы для переключения ступеней [5]. Работа современных регуляторов основана на адаптивных моделях прогнозирования, например на сутки вперед [6]. В этом случае могут потребоваться дополнительные расчеты и мероприятия.

Методы прогнозирования реактивной мощности также различаются и могут быть достаточно сложными. Например, если речь идет о сети с различными потребителями, то могут применяться комбинаторные методы, включающие теорию

случайных процессов и обратное вейвлет-преобразование [7]. прогнозирование с использованием искусственной нейронной сети [8], моделей глубокого обучения [9].

Одним из наиболее распространенных способов компенсации реактивной мощности является применение статического синхронного компенсатора [10]. Также возможно использование косинусных конденсаторов [11], тиристорных коммутируемых конденсаторных батарей [12] или более сложных гибридных устройств с преобразователями [13], параллельных активных фильтров [14], обладающих рядом ограничений, твердотельных трансформаторов [15], накопителей энергии для оптимизации распределения мощностей [16].

Отдельные ученые предлагают использовать ветроэлектростанции и солнечные электростанции для оптимизации режимов электроэнергетической системы в целом и для этого размещать их в ключевых точках, определяемых с помощью алгоритма оптимизации роя частиц [17].

Таким образом, проблематика компенсации реактивной мощности актуальна и требует разных решений для отдельно взятых задач и условий.

Целью исследования является: анализ одного из возможных способов компенсации – с помощью модульного компенсатора реактивной мощности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использовались экспериментальные и аналитические методы. Экспериментальные данные получены при помощи измерительного оборудования Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанций. Для визуализации осциллограмм применялся Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Первый экспериментальный образец модульного компенсатора реактивной мощности был смонтирован на Мирновской ВЭС на трансформаторной подстанции (ТП) № 3 мощностью 1000 кВА.

В период опытной эксплуатации модульный компенсатор показал высокую энергетическую эффективность. Удалось добиться практически нулевого перетока реактивной энергии на шинах 35 кВ трансформаторной подстанции ветроэнергетического модуля (ВЭМ).

Наличие функции автоматического создания баз данных параметров работы модульного компенсатора реактивной мощности (КРМ), а также баз данных автоматического мониторинга параметров электрической энергии измерительного комплекса промышленных ветроэлектрических станций, позволяет провести анализ результатов опытной эксплуатации модульного КРМ.

На рис. 1 приведены осциллограммы активной и реактивной мощностей на 2-х часовых интервалах

времени для двух ветроэлектрических модулей ТП-3 и ТП-11. По количеству подключенных к ним ветротурбин (9 шт.) и по конструктивному исполнению они абсолютно одинаковы, за исключением того, что на ТП-3 установлен модульный компенсатор реактивной мощности и расположены они в разных местах. Измерения параметров электроэнергии осуществлялись комплексом с периодом квантования 1 с, однако для визуализации результаты измерения представлены на рисунках одним значением на 10-и секундном интервале времени.

Осциллограммы соответствуют различным нагрузочным режимам работы ВЭМ. Измерения на двух ТП производились синхронно, однако графики активной мощности немного отличаются по величине и фазе в результате пространственного распределения скоростей ветра на территории станции. Генерируемая активная мощность изменялась в диапазоне 0,1-0,8 номинального значения. Применение модульного КРМ, установленного на ТП-3, позволило оперативно реагировать на изменение потребления реактивной мощности и практически полностью её компенсировать. Незначительные отклонения реактивной мощности на ТП-3 обусловлены дискретным изменением ёмкости конденсаторных батарей и действием задержки времени (60 с) момента коммутации. Следовательно, работа модульного КРМ удовлетворяет требованиям обеспечения непрерывной компенсации реактивной мощности в процессе генерирования активной мощности в полном диапазоне изменения скорости ветра.

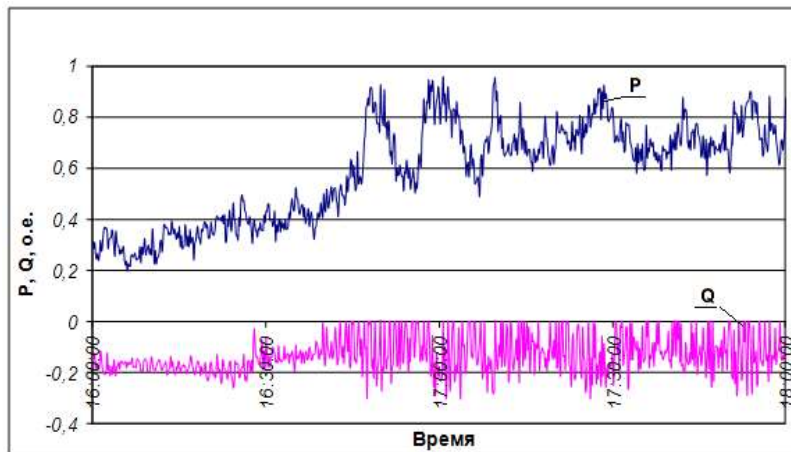
Результаты анализа объемов активной и реактивной энергии, измеренных на шинах ТП-3 и ВЭС на протяжении года, представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что на ТП-3 достигнута практически полная компенсация реактивной мощности, потребляемая ветроэлектрическим модулем. Среднее значение коэффициента мощности за год эксплуатации составило 0,999. В то же время, по станции в целом, которая состоит из ВЭУ USW 56-100, укомплектованными только штатными компенсирующими конденсаторами, он оставался значительно ниже (0,8522). Если аналогичные модульные КРМ установить на остальных 12-ти ТП, то можно достичь практически полной компенсации потребляемой реактивной мощности на шинах Мирновской ВЭС.

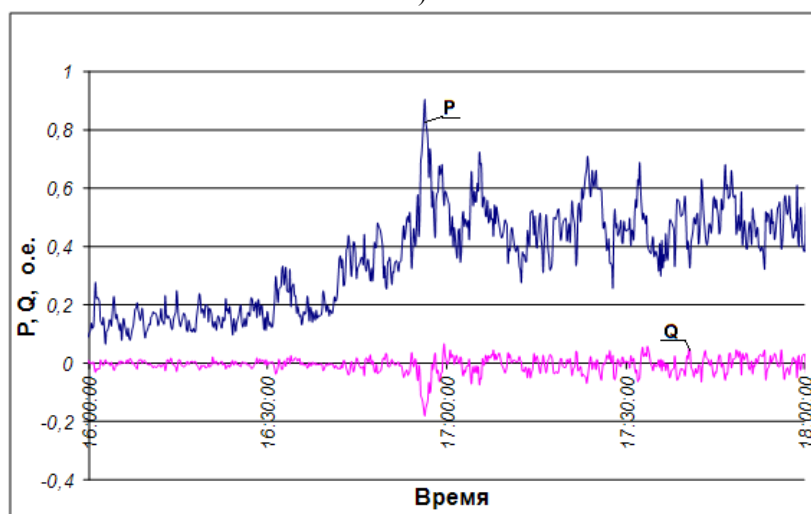
Зная тяжелый характер работы КРМ в условиях действующей промышленной ВЭС, оценим некоторые показатели его надежности. Оценку проведём косвенным методом, используя данные функции самодиагностики ресурса основных его элементов и их паспортных данных.

Самым нагруженным элементом модульного компенсатора реактивной мощности являются силовые контакторы включения конденсаторов и сами конденсаторы. Согласно паспортным данным коммутационная износостойкость контакторов

11BF40K.10 фирмы “Lovato” составляет не менее 200000 циклов включений / отключений.



а)



б)

**Рис. 1.** Осциллограммы измеренных мгновенных значений активной и реактивной мощностей: а) на ТП-11; б) на ТП-3  
**Fig. 1.** Oscillograms of measured instant values of active and reactive capacities: а) on the transformer substation number 11; б) on the transformer substation number 3

**Таблица 1.** Объемы перетоков активной и реактивной электроэнергии на шинах Мирновской ВЭС и ТП-3  
**Table 1.** Volumes of active and reactive electricity flows on busbars of the Mirnovskaya wind farm and on the transformer substation number 3

Год, месяц	Шины 35 кВ Мирновской ВЭС			Шины 35 кВ ТП-3		
	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Коэффициент мощности $\cos \varphi$
2021 год						
Март	1939602	822003	0,9207	115747	3470	0,9996
Апрель	400029	258258	0,8401	23242	995	0,9991
Май	578655	322371	0,8736	26529	878	0,9995
Июнь	119658	210420	0,4943	13203	897	0,9977
Июль	573762	553665	0,7196	34922	2373	0,9977
Август	254793	334236	0,6062	20868	1419	0,9977
Сентябрь	173649	255213	0,5625	16183	1100	0,9977
Октябрь	409059	372120	0,7397	22457	1006	0,9990
Ноябрь	550557	325920	0,8605	29546	1316	0,9990
Декабрь	441861	306621	0,8216	22595	1237	0,9985
2022 год						
Январь	1782732	807891	0,9108	87285	4543	0,9986
Февраль	1216824	613515	0,8929	52199	2784	0,9986
Итого	8441181	5182233	0,8522	464776	22018	0,999

По данным счетчика включений / отключений силовых контакторов количество коммутаций за год эксплуатации составило 4982 циклов (для каждой из 9-ти ступеней конденсаторов). Таким образом, средний срок службы силовых контакторов модульного КРМ в условиях работы на промышленной ВЭС составит порядка 40 лет. В модульном компенсаторе реактивной мощности использованы трехфазные силовые конденсаторы типа МКРg 400V 50Hz 3x137μF 20 kvar “Electronicon” каждый. Они изготовлены по современной технологии, газонаполнены азотом, имеют встроенную защиту от превышения давления и низкий тангенс угла диэлектрических потерь. Диэлектрик восстанавливается после пробоя. Минимальный срок службы без уменьшения емкости, который дает завод-изготовитель, составляет не менее 200000 часов. Нарботка конденсаторов по данным системы самодиагностики составила за год 735 часов работы каждого конденсатора. Таким образом, средний срок службы силовых конденсаторов, в условиях работы промышленной ВЭС превышает средний срок службы силовых контакторов.

За 2 года эксплуатации не было зафиксировано ни одного отказа, то можно считать, что минимальное время средней наработки на отказ составляет на уровне 18000 часов (с учетом времени

функционирования КРМ при пусконаладочных работах).

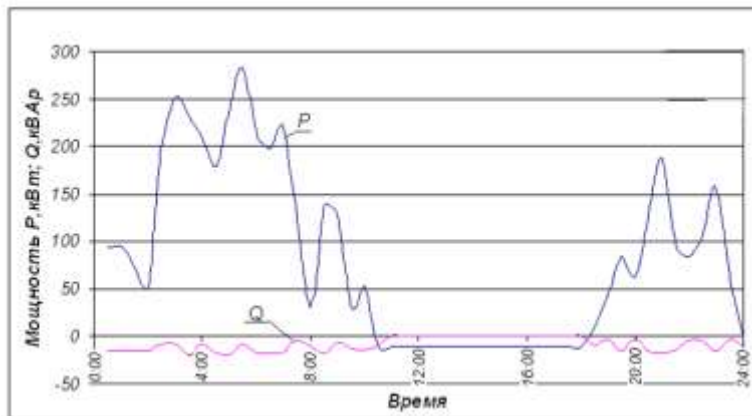
Модульный компенсатор реактивной мощности Мирновской ВЭС характеризуется следующими свойствами:

- полная компенсация потребляемой реактивной электроэнергии ветроэлектрическим модулем;
- электромагнитная совместимость с электрической сетью;
- высокая надежность в работе и долговечность;
- срок окупаемости составляет около 2 лет в результате полной автоматизации всех производственных процессов и невысокой стоимости реализации;

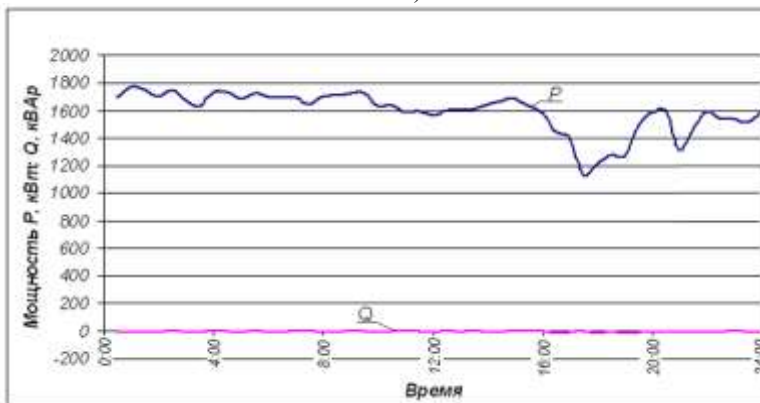
- возможность поэтапного внедрения модульных КРМ для уменьшения потребления реактивной мощности ВЭС и достижения ее нулевого перетока.

На Пресноводненской ВЭС были смонтированы модульные компенсаторы реактивной мощности на всех 5 трансформаторных подстанциях. Управление режимами работы компенсаторов реализовано как с низкой стороны 0,4 кВ, так и с высокой стороны 35 кВ.

На рис. 2 показаны суточные, а на рис. 3 – месячный график нагрузки активной и реактивной мощностей Пресноводненской ВЭС, записанные с периодом интеграции 30 мин системой коммерческого учета электроэнергии.



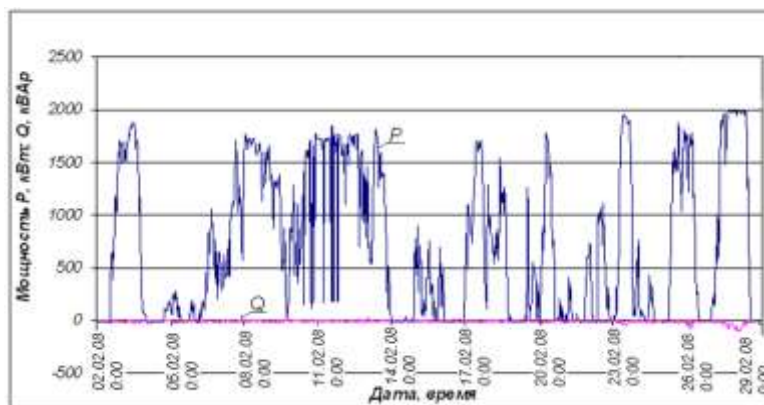
а)



б)

**Рис. 2.** Суточные графики нагрузки Пресноводненской ВЭС: а) график нагрузки за 5 февраля 2022 года с периодом интеграции 30 мин; б) график нагрузки за 8 февраля 2022 года с периодом интеграции 30 мин

**Fig. 2.** Daily load schedules of Presnovodnenskaya wind farm: а) load schedule for February 5, 2022 with an integration period of 30 minutes; б) load schedule for February 8, 2022 with an integration period of 30 minutes



**Рис. 3.** График нагрузки мощностей за февраль 2022 г. Пресноводненской ВЭС с периодом интеграции 30 мин  
**Fig. 3.** Capacity load schedule for February 2022 of Presnovodnenskaya wind farm with an integration period of 30 minutes

На графиках представлены результаты работы станции при генерировании различных мощностей и в режиме покоя. Так на рис. 2, а, с 11-00 до 18-00 можем наблюдать режим покоя (при отсутствии ветра), который характеризуется небольшим потреблением активной мощности (11 кВт) для собственных нужд станции и практически нулевым потреблением реактивной мощности.

Потребление реактивной мощности станцией в режиме покоя полностью компенсируется нерегулируемыми конденсаторными батареями, которые установлены на всех ТП. В периоды времени с 00-00 до 11-00 и с 18-00 до 24-00 станция работает в режиме малой нагрузки и здесь отчетливо видно, что максимальное отклонение по реактивной мощности составляет 20 кВАр, то есть она равна одной ступени дискретного изменения емкости КРМ. На рис. 2, б, можно наблюдать режим генерации станции на протяжении всех суток, который характеризуется изменением генерируемой активной мощности в диапазоне 1,1 – 1,8 МВт и практически нулевым перетоком реактивной мощности. Потребление реактивной мощности станции в режиме генерации полностью

компенсируется модульными КРМ, управляемыми в автоматическом режиме.

На рис. 3 представлены все режимы работы Пресноводненской ВЭС в течение одного месяца (покоя и генерации во всем диапазоне мощностей) при полной компенсации реактивной мощности.

Анализируя эти графики, можно сделать вывод, что модульные компенсаторы реактивной мощности, включенные в схему трансформаторных подстанций ВЭМ, эффективно компенсируют потребляемую реактивную электроэнергию промышленной ВЭС с асинхронными генераторами при различных режимах работы.

Так как модульные компенсаторы реактивной мощности были установлены на всех ВЭМ Пресноводненской ВЭС, то это позволило сократить до минимума потребление реактивной электроэнергии на каждой трансформаторной подстанции и обеспечить практически нулевой ее переток на шинах всей ВЭС. Результаты функционирования станции на протяжении года приведены в таблице 2. Они подтверждают энергетическую эффективность работы модульных компенсаторов реактивной мощности в составе промышленной ВЭС.

**Таблица 2.** Объемы перетоков активной и реактивной электроэнергии Пресноводненской ВЭС  
**Table 2.** Volumes of active and reactive electricity flows of Presnovodnenskaya wind farm

Год, месяц	Пресноводненская ВЭС			
	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Отношение реактивной мощности к активной	Коэффициент мощности $\cos \varphi$
2021 год				
Июнь	470713	13840	0,029	0,9996
Июль	279978	12352	0,044	0,9990
Август	435839	15506	0,036	0,9994
Сентябрь	473684	14177	0,030	0,9996
Октябрь	371103	13508	0,036	0,9993
Ноябрь	928737	13099	0,014	0,9999
Декабрь	589504	21763	0,037	0,9993
2022 год				
Январь	852749	17936	0,021	0,9998
Февраль	917219	12089	0,013	0,9999
Март	862337	18594	0,022	0,9998
Апрель	601434	12979	0,022	0,9998
Май	264983	12993	0,049	0,9998
Итого	7048280	178836	0,025	0,9997

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в статье проведен анализ работы модульных компенсаторов реактивной мощности на двух ветроэлектростанциях Крыма – Мирновской и Пресноводненской. Результаты измерений генерации активной и потребления реактивной мощности показывают, что использование подобного рода устройств, помимо собственных конденсаторных батарей, установленных в шкафах управления, существенно повышает коэффициент мощности. Например, на Мирновской ветроэлектростанции среднегодовой коэффициент мощности увеличился до 0,999 на шинах ТП-3 и реактивная мощность компенсировалась практически полностью. На Пресноводненской ветроэлектростанции среднегодовой коэффициент мощности достиг значения – 0,9997, что даже несколько больше.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малюк Е.Г. Реактивная мощность и особенности компенсации реактивной мощности в сетях жилищно-коммунального сектора // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 1. С. 57-62.
2. Ребровская Д.А., Кузнецов А.В. Анализ моделей снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 12-2. С. 19-23.
3. Кузнецов А.В., Ребровская Д.А., Юренков Ю.П. Упрощение модели оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 4. С. 82-89.
4. Табаров Б.Д., Соловьев В.А. Исследование управления семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном регулировании реактивной мощности // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5 (69). С. 61-66.
5. Басманов В.Г., Порошин Д.А. Разработка математической модели адаптивного регулятора реактивной мощности для конденсаторных установок // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 2. С. 55-59.
6. Hong Wang, Chao Yuan, Wen Gu, et al. Multitime Scale Reactive Power and Voltage Optimal Regulation for Transmission Network With Wind Power Cluster Based on Model Predictive Control // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2024. 10.1155/2024/7687093.
7. Савина Н.В., Казакул А.А. Прогнозирование реактивной мощности узлов нагрузки для оптимальной компенсации реактивной мощности в условиях неопределённости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012.

№ 2 (61). С. 92-99.

8. Полюнянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2 (226). С. 31-46.
9. Diaa Salman, Abdirahman Farah, Suleiman Abdullahi Ali, et al. Enhancing Power Grid Stability through Reactive Power Demand Forecasting Using Deep Learning // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2024. 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P116.
10. Пашкин И.А., Николайчук Д.Г., Ставнистов А.О., и др. Компенсация реактивной мощности в энергосистеме путём применения статического синхронного компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2022. № 3-1 (40). С. 31-33.
11. Широкова О.Е., Лапонов А.С. Вопросы компенсации реактивной мощности в электросетях // В сборнике: Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК. Сборник материалов международной научно-технической конференции. 2022. С. 260 – 263.
12. Kushakov G. The reactive power compensation in nonlinear electrical loads // Universum: технические науки. 2022. № 5-12 (98). С. 7-9.
13. Goolak S., Tkachenko V., Kyrychenko M., et al. Hybrid reactive power compensator with adaptation of the operation of the control system to the parameters of the mains voltage // Problems of the Regional Energetics. 2023. № 1 (57). С. 1-16.
14. Чернецкий И.А., Стрельников П.А., Семенов В.Д. Способ компенсации реактивной мощности и мощности искажений в трехфазной сети // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2022. № 1-1. С. 130-132.
15. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian. An Effective SST-FLC for Mitigation of Reactive Power Compensation of DFIG Based Wind Energy Conversion System // Electric Power Components and Systems. 2024. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.
16. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc.. Distributed energy storage participates in reactive power optimization strategy research of new distribution system // Journal of Physics Conference Series. 2024. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.
17. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm // Materials Science. Power Engineering. 2021. Т. 27. № 1. С. 5-20.

## REFERENCES

1. Malyuk E.G. Reactive power and features of compensation for reactive power in the houses of the housing and communal sector // Energeticheskie

- ustanovki i tehnologii. 2017. V. 3. No. 1. pp. 57-62. (In Russian).
2. Rebrovskaya D.A., Kuznecov A.V. Analysis of models of reducing power loss in the network organization when compensating for reactive power in the consumer network // *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologiyah - MMTT*. 2020. V. 12-2. pp. 19-23. (In Russian).
3. Kuznecov A.V., Rebrovskaya D.A., Yurenkov Yu.P. Simplification of the model for assessing reduction of power losses in the network organization during compensation for reactive power in the consumer network // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2019. V. 62. No. 4. pp. 82-89. (In Russian).
4. Tabarov B.D., Solovev V.A. A study of the seven-speed compensator of reactive power in discrete regulation of reactive power // *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2023. No. 5 (69). pp. 61-66. (In Russian).
5. Basmanov V.G., Poroshin D.A. Development of a mathematical model of adaptive reactive power regulator for capacitor installations // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2013. No. 2. pp. 55-59. (In Russian).
6. Hong Wang, Chao Yuan, Wen Gu, et al. Multitime Scale Reactive Power and Voltage Optimal Regulation for Transmission Network With Wind Power Cluster Based on Model Predictive Control. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2024. 10.1155/2024/7687093.
7. Savina N.V., Kazakul A.A. Prediction of the reactive power of the load nodes for optimal compensation for reactive power in conditions of uncertainty // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2012. No. 2 (61). pp. 92-99. (In Russian).
8. Poluyanovich N.K., DUBYAGO M.N. Assessment of influencing factors and forecasting of electrical consumption in the regional energy system, taking into account the regime of its operation // *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki*. 2022. No. 2 (226). pp. 31-46. (In Russian).
9. Diaa Salman, Abdirahman Farah, Suleiman Abdullahi Ali, et al. Enhancing Power Grid Stability through Reactive Power Demand Forecasting Using Deep Learning // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2024. 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P116.
10. Pashkin I.A., Nikolaychuk D.G., Stavnistov A.O., et al. Compensation of reactive power in the energy system by using a static synchronous compensator of reactive power by stature // *Sovremennaya shkola Rossii. Voprosy modernizacii*. 2022. No. 3-1 (40). pp. 31-33. (In Russian).
11. Shirobokova O.E., Laponov A.S. Issues of compensation for reactive power in electric networks. In the collection: problems of energy supply, automation, informatization and nature management in the agro-industrial complex. A collection of materials of the International Scientific and Technical Conference. 2022. pp. 260 - 263. (In Russian).
12. Kushakov G. The reactive power compensation in nonlinear electrical loads // *Universum: Technical sciences*. 2022. No. 5-12 (98). pp. 7-9.
13. Goolak S., Tkachenko V., Kyrychenko M., et al. Hybrid reactive power compensator with adaptation of the operation of the control system to the parameters of the mains voltage // *Problems of the Regional Energetics*. 2023. No. 1 (57). pp. 1-16.
14. Chernetsky I.A., Strelnikov P.A., Semenov V.D. A method of compensation for reactive power and distortion power in a three-phase network // *Sbornik izbrannyh statej nauchnoj sessii TUSUR*. 2022. No. 1-1. pp. 130-132. (In Russian).
15. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian. An Effective SST-FLC for Mitigation of Reactive Power Compensation of DFIG Based Wind Energy Conversion System // *Electric Power Components and Systems*. 2024. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.
16. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc.. Distributed energy storage participates in reactive power optimization strategy research of new distribution system // *Journal of Physics Conference Series*. 2024. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.
17. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm // *Materials Science. Power Engineering*. 2021. V. 27. No. 1. pp. 5-20.

## ANALYSIS OF INDUSTRIAL TESTS OF MODULAR REACTIVE POWER COMPENSATOR AT CRIMEAN WIND FARMS

Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Bekirov O.S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology,  
Address: Simferopol, 181, Kyivska Street,  
e-mail: Bekirov.e.a@cfuv.ru

**Abstract.** The article studies the operation of modular reactive power compensators at the Mirnovskaya and Presnovodnenskaya wind farms. For this purpose, measurements of active and reactive power for short periods of time are given: several hours for the Mirnovskaya wind farm and per day for the Presnovodnenskaya wind farm, as well as values for each month for one year. Reactive power fluctuations when using reactive power compensators can be very insignificant, mainly due to the switching time, and the efficiency is justified by increasing the power factors to values close to unity.

**Subject:** wind farms. All wind farms both generate active power, which is a function of wind speed, and consume reactive power. Both of these processes can be observed at the same time and there is a problem related to a decrease in the power factor. Capacitor batteries located in control cabinets are often not enough to solve it.

**Materials and methods:** analytical and experimental methods were used. Measurements were carried out at the Mirnovskaya and Presnovodnenskaya wind farms..

**Results:** It has been established that the use of modular reactive power compensators at wind farms makes it possible to almost completely compensate for the consumption of reactive power.

**Conclusions:** Studies have shown that wind farms need to install additional compensating devices to increase the power factor to values close to unity, and almost completely cover the need for reactive power both in modes close to nominal and in the absence of wind.

**Key words:** reactive power compensator; wind farm; oscillogram; wind power module; transformer substation.

УДК 691

МОДИФИКАЦИЯ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ПОРОШКОМ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА  $WO_3$ , ОБЛАДАЮЩИМ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИГавриш В.М.<sup>1</sup>, Чайка Т.В.<sup>1</sup>, Корсак Д.В.<sup>1</sup>, Чайка А.К.<sup>2</sup><sup>1</sup> Севастопольский государственный университет

Адрес: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Адрес: 199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования фотокаталитической активности при видимом свете, высокодисперсного порошка оксида вольфрама  $WO_3$ , полученного в результате рециклинга твердосплавных изделий. Выполнен микроструктурный анализ порошка оксида вольфрама с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) до и после процесса фотокатализа. Представлены результаты испытаний физико-механических свойств (плотность, прочность при сжатии, водопоглощение, общая пористость) цементной матрицы с различным содержанием порошка  $WO_3$  (1–5 масс. %). Проведен предварительный анализ модифицированной поверхности на самоочищающиеся свойства.

**Предмет исследования:** Цементная матрица, модифицированная фотокатализатором на основе высокодисперсного порошка оксида вольфрама  $WO_3$ .

**Материалы и методы:** В качестве фотокатализатора применяли высокодисперсный порошок оксида вольфрама (средний размер частиц 40 до 200 нм). Фотокаталитическая активность порошка  $WO_3$  оценивалась путем определения степени деструкции модельного органического загрязнителя метиленового синего с концентрацией 15 мг/л методом фотометрического анализа раствора с помощью прибора «Эксперт 003» при длине волны 654 нм. Микроструктура порошка оксида вольфрама исследовалась на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX. Для изготовления цементных матриц с фотокатализатором использовали портландцемент ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС. Физико-механические свойства цементных образцов определяли по стандартным методикам ГОСТ 30744-2001, ГОСТ 30744-2001.

**Результаты:** Результаты исследования показали, что фотокаталитическая активность порошка оксида вольфрама возрастает с увеличением его концентрации в растворе и времени облучения видимым светом. Максимальная деградация 89 % красителя, наблюдается при добавлении 5,0 г/л порошка  $WO_3$ , через 180 мин после начала реакции. Добавление порошка оксида вольфрама в цементную матрицу приводит к увеличению плотности, прочности на сжатие, снижению водопоглощения и общей пористости. Визуальный анализ обесцвечивания органического красителя на поверхности модифицированной цементной матрицы предположительно связан со способностью поверхности к самоочищению благодаря фотокаталитическим свойствам оксида вольфрама.

**Выводы:** Использование высокодисперсного порошка оксида вольфрама в цементных матрицах имеет большой потенциал для создания самоочищающихся строительных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, а также способностью разлагать загрязняющие органические вещества под воздействием видимого света.

**Ключевые слова:** фотокатализ, высокодисперсный порошок, триоксид вольфрама, цементный материал, самоочищение, прочность.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнения фасадов зданий, сооружений и объектов культурного наследия, приводящие к изменениям не только внешнего вида, но и к физической деградации или коррозии, а также высокие затраты на реставрационные работы являются актуальными проблемами. Поэтому к выбору строительных материалов предъявляются достаточно строгие требования по эстетическим, физико-техническим и экологическим характеристикам [1-2].

Согласно результатам современных исследований [3-20] применение технологии фотокатализа в строительстве может значительно улучшить самоочищающиеся свойства материалов [3]. Для разложения загрязняющих веществ под воздействием солнечного света, используются полупроводниковые фотокатализаторы, такие как оксиды металлов ( $ZnO$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  и др.), сульфиды ( $CdS$  и  $ZnS$ ) и другие соединения [4-8]. Большинство из них, для химической активации валентных

электронов, которые разрушают загрязняющие вещества, могут работать только в ультрафиолетовом свете, не позволяя использовать солнечный свет в более полном объеме [5]. В связи с этим в последние годы активно ведутся исследования и разработки фотокатализаторов, реагирующих и на видимый спектр солнечного света.

Для повышения эффективности протекания фотокаталитических реакций при использовании полупроводников и композиционных материалов на их основе необходимо, чтобы фотокатализатор находился в форме высокодисперсного порошка, то есть имел высокую удельную поверхность, благодаря чему на поверхности фотокатализатора образуется множество активных центров, что способствует образованию более реакционноспособных частиц для эффективного фоторазложения [6-7].

В настоящее время производство и внедрение фотокаталитических материалов в России не достигли должного уровня. Это обусловлено отсутствием экономически эффективных

технологий для создания и применения фотокатализаторов, которые при сохранении высокой фотокаталитической, удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к компонентам цементных систем для достижения высоких физико-механических характеристик конечного продукта. Фотокатализаторы, вводимые в цементные растворы обычно на стадии их приготовления, могут значительно влиять на характеристики растворных смесей, процессы гидратации и эксплуатационные свойства изделий.

В связи с этим, создание фотокатализатора, который эффективно работает в широком спектре света и может быть легко интегрирован в цементные системы, улучшая их физико-механические свойства, является актуальной научной задачей.

Одним из перспективных вариантов решения данной задачи является использование высокодисперсного порошка триоксида вольфрама  $WO_3$ , полученного из твердосплавных отходов по технологии [27]. Этот метод позволяет синтезировать высокодисперсные порошки в промышленном объеме с относительно низкой стоимостью конечного продукта. Однако, в виду отсутствия достаточных исследований о возможности применения данного порошка в качестве фотокатализатора, целесообразности использования его в цементных материалах с целью увеличения физико-механических характеристик и придания самоочищающихся свойств, вызывает значительный исследовательский и практический интерес.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

На сегодняшний день наиболее предпочтительными фотокатализаторами считаются твердые полупроводники, такие как оксиды и сульфиды металлов [7-31]. Самым широко используемым из них является диоксид титана  $TiO_2$ , благодаря его фотокаталитической активности, прочности и совместимости со строительными материалами, низкой стоимостью, химической стабильностью [8-9]. Однако  $TiO_2$  имеет два основных недостатка: первый – ширина запрещенной зоны (3,0-3,2 эВ), т.е. длина волны возбуждения находится в ультрафиолетовой области. Второй недостаток связан с высокой рекомбинацией фотогенерированных электронно-дырочных пар, что приводит к низкой квантовой эффективности [10-12]. Большой потенциал в качестве эффективного фотокатализатора продемонстрировал полупроводниковый оксид цинка n-типа ( $ZnO$ ), благодаря окислительной способности, регулируемому размеру, высокой химической стабильности, низкой токсичности [13]. Однако, данный оксид также реагирует только на ультрафиолетовое излучение, что значительно понижает его производительность.

В последние годы все больше исследований направлено на разработку фотокатализаторов, активных под воздействием видимого спектра

солнечного света. Это стало новой тенденцией в области исследований фотокатализаторов. Одним из методов, используемых для решения этой задачи, является регулирование запрещенной зоны  $TiO_2$  посредством модификации поверхности, легирования и т.д.

В работе [14] применялся  $TiO_2$ , легированный железом и ванадием ( $Fe-TiO_2$  и  $V-TiO_2$ ) в качестве фотокатализатора, чувствительного к видимому свету. Эксперименты показали, что использование легированных фотокатализаторов способствует более эффективному удалению оксида азота  $NO$  при видимом освещении. Некоторые драгоценные металлы, такие как платина  $Pt$  и золото  $Au$ , также могут эффективно усиливать фотокаталитическую активность диоксида титана, однако эти металлы являются редкими и дорогостоящими в использовании [15].

В настоящее время разработаны различные полупроводниковые фотокатализаторы с узкой запрещенной зоной, такие как  $WO_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CdS$ ,  $BiVO_4$ ,  $Bi_2WO_6$ ,  $Ag_3PO_4$ ,  $g-C_{34}$  и др., которые чувствительны к видимому свету [16-22]. Графитофазный нитрид углерода ( $g-C_3N_4$ ) в последние годы продемонстрировал многообещающие перспективы в применении, благодаря своей двумерной (2D) слоистой структурой и  $\pi$ -сопряженной системой, которая обеспечивает подходящую полосу пропускания ( $\approx 2,7$  эВ) и хорошие фотокаталитические характеристики, по сравнению с традиционными полупроводниками ( $TiO_2$ ,  $ZnO$  и др.) [17]. Полупроводник  $CdS$  с полосой пропускания 2,42 эВ, эффективен при фотокатализе в видимом свете [19], однако он подвержен фотокоррозии и может разлагаться на мономеры серы и ионы кадмия, что приводит к потере каталитической активности, затрудняя его практическое применение [20].

Большой интерес вызывают оксиды вольфрама ( $WO_x$ ,  $X \leq 3$ ), благодаря узкой запрещенной зоны (2,4–2,8 эВ), сильной фотокаталитической окислительной способности, высокой химической стабильности и нетоксичности. Кроме того,  $WO_x$  обладают гораздо более высокой подвижностью электронов ( $10-12 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ), чем  $TiO_2$  ( $0,3 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) и сравнительно большей длиной диффузии в дырках (150–500 нм) по сравнению с  $\alpha-Fe_2O_3$  (2–4 нм), оба из которых необходимы для переноса и разделения фотогенерированных носителей заряда [18].

Во многом эффективность функционирования фотокатализатора зависит от состава и структуры матрицы. Композиты на основе цементной матрицы, содержащие фотокатализаторы, продемонстрировали большой потенциал в снижении концентраций органических веществ [3-8, 23-26]. Затвердевшие цементные пасты обладают пористой структурой с высокой связующей способностью, которая хорошо подходит для иммобилизации порошков фотокатализаторов и других продуктов фотоокисления. Многие исследования [5-6] показали, что цементные

покрытия и наружные поверхности зданий являются наилучшей средой для загрузки фотокатализатора, поскольку обладают значительной площадью поверхности для фотокаталитических реакций и в большинстве случаев плоской структурой покрытия, которая напрямую подвергает фотокатализатор воздействию солнечного света и загрязняющих веществ.

На сегодняшний день наиболее изучено влияние на цементную матрицу фотокатализатора на основе оксида титана. Авторы [23-26] показали, что  $\text{TiO}_2$  может значительно ускорить гидратацию цемента и повысить прочность цементного раствора при сжатии. Согласно механическим испытаниям фотокаталитических материалов на основе цемента, проведенным авторами [23] установлено, что введение наночастиц  $\text{TiO}_2$  делает внутреннюю структуру бетона более плотной и, таким образом, приводит к повышению прочности. Исследования [8] показали, что фотокаталитическая активность бетона с  $\text{TiO}_2$  со временем снижается, что связано с неравномерным распределением частиц  $\text{TiO}_2$  в цементной матрице, приводящей к образованию областей с низкой фотокаталитической активностью или вообще без нее. Продукты гидратации в значительной степени инкапсулируют частицы  $\text{TiO}_2$ , уменьшая проникновение света и значительно снижая фотокаталитическую активность.

Несмотря на значительный прогресс в разработках различных фотокатализаторов и исследованиях самоочищающихся материалов, все еще остаются проблемы и ограничения в применении их в строительной отрасли. Сегодняшние задачи заключаются в разработке фотокатализаторов с высокой эффективностью, стабильностью и низкой стоимостью для практического применения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве фотокатализатора использовался высокодисперсный порошок оксида вольфрама (размер частиц от 40 до 200 нм, преимущественно триклинной кристаллической структуры полученный по технологии [27]).

В качестве цементной матрицы применялся поргланцемент ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС (ООО Лиман, город Новороссийск ОАО «Верхнебеканский цементный завод», РФ, ГОСТ 22266-2013, вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011).

Фотокаталитическая активность порошка оксида вольфрама оценивалась путем определения степени деструкции модельного органического загрязнителя (красителя) метиленового синего в водном растворе с концентрацией 15 мг/л. Количество фотокатализатора в растворе загрязнителя составляло 0,5; 1; 2; 5 г/л. Облучение полученных растворов проводили при освещении лампой

видимого спектра излучения 570–590 нм мощностью 24 Вт, расположенной на высоте 50 см в течение 30, 60, 120, 180 минут соответственно, при постоянном перемешивании, с использованием магнитных мешалок Stegler HS. В результате растворы с фотокатализатором подвергались воздействию всего спектра электромагнитного излучения. Высокодисперсные порошки удалялись из раствора центрифугой «Центрифуга 80-1», при 4500 об/мин в течение 20 минут. Изменение концентрации раствора метиленового синего оценивалось методом фотометрического анализа раствора с помощью прибора «Эксперт 003» при длине волны 654 нм.

Микроструктура порошка оксида вольфрама исследовалась на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom-World B.V. (Нидерланды).

Влияние частиц оксида вольфрама  $\text{WO}_3$  на физико-механические свойства цементного материала изучалось на образцах размером 2x2x2 см в возрасте 28 суток. Доля замены добавки в вяжущем составляла 1; 2; 3; 4; 5 % по массе. Порошок  $\text{WO}_3$  вводился в цемент в сухом состоянии, далее производилось смешивание смеси в смесителе С2.0 "ТУРБУЛА" (Санкт-Петербург, ООО «ВИБРОТЕХНИК») в течение 5 минут для получения однородной смеси, с последующим затворением полученной сухой смеси водой.

Образцы перед проведением исследования водопоглощения высушивались при 80 °С в течение 24 часов, чтобы свести к минимуму повреждения микроструктуры от чрезмерной сушки, затем помещались в емкости с водой, в которых поддерживалась постоянная температура (20±2 °С). Насыщение образцов производилось до тех пор, пока результаты взвешиваний стали отличаться не более чем на 0,01 г от предыдущих взвешиваний ГОСТ 30744-2001.

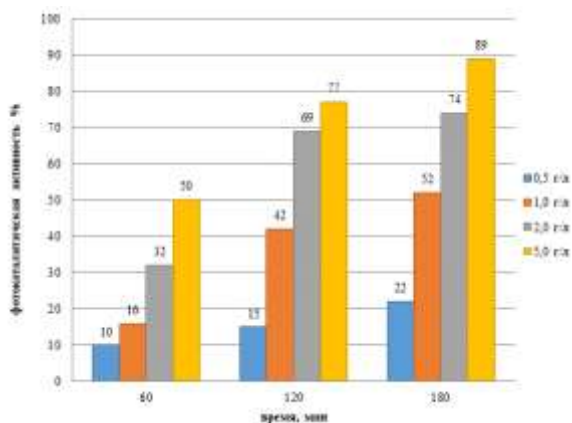
Пористость цементного камня определялась путем определения средней и истинной плотности продуктов гидратации с помощью прибора Лешатель-Кандло. ГОСТ 30744-2001.

Исследования физико-механических характеристик проводилось с использованием универсальной испытательной машины ТРМ – 500 «Тоchline» (ООО «Завод испытательных приборов» (ЗИП), г.Иваново).

С целью предварительной оценки самоочищающейся способности фотокаталитических покрытий, на поверхности цементных образцов была нанесена капля раствора метиленового синего с использованием микропипетки. Затем образцы были подвергнуты воздействию видимого света в течение 3 часов. Оценка фотокаталитической активности образцов проводилась по визуальному наблюдению изменения интенсивности цвета органического красителя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

### 1. Фотокаталитические свойства порошка оксида вольфрама

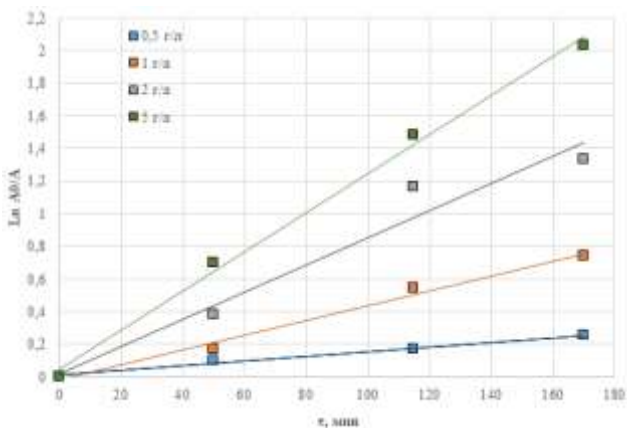


**Рис. 1.** Изменение фотокаталитической активности WO<sub>3</sub> с течением времени при видимом свете  
**Fig. 1.** Changes in the photocatalytic activity of WO<sub>3</sub> over time under visible light

Через час после начала эксперимента фотокаталитическая активность порошка оксида вольфрама при добавлении 0,5 г/л, 1,0 г/л, 2,0 г/л и 5,0 г/л составила 10, 15, 32 и 50% соответственно. Максимальная деградация 89 % красителя, наблюдается при добавлении 5,0 г/л порошка WO<sub>3</sub>, через 180 мин после начала реакции.

На рисунке 2 представлены графики зависимости  $-\ln(C/C_0)$  от времени облучения, соответствующие кинетическим законом реакции первого порядка. Кинетику можно выразить следующим образом:  $-\ln(C/C_0) = k_{app} t$ , где  $k_{app}$  - кажущаяся константа скорости реакции, а  $C_0$  и  $C$  -

Результаты исследования показали, что фотокаталитическая активность порошка оксида вольфрама возрастает с увеличением его концентрации в растворе и времени облучения видимым светом (рис. 1).

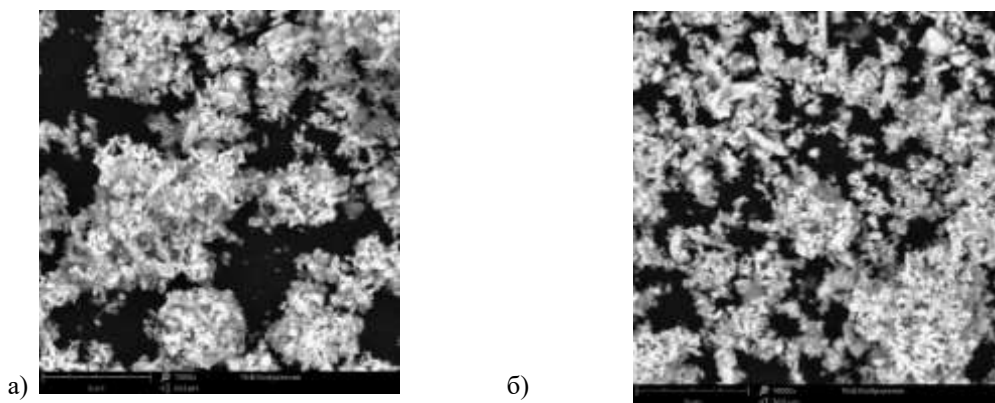


**Рис. 2.** Кинетика разложения метиленового синего в зависимости от времени  
**Fig. 2.** Kinetics of decomposition of methylene blue as a function of time

начальная концентрация и реакционная концентрация красителя соответственно.

### 2. Микроструктура порошка оксида вольфрама

Как видно из микроснимков (рис. 3), частицы порошка вольфрама представляют собой агломераты частиц, неправильной иглоподобной формы. После проведения эксперимента структура порошка не изменена, что может косвенно указывать на отсутствие химического взаимодействия между фотокатализатором и органическим красителем.



**Рис. 3.** Порошок оксида вольфрама до и после процесса фотокатализа при увеличении  $\times 10\,000$  раз:  
 а) до начала эксперимента; б) после проведения эксперимента  
**Fig. 3.** Tungsten oxide powder before and after the photocatalysis process at a magnification of  $\times 10,000$  times:  
 а) before the start of the experiment; б) after the experiment

### 3. Физико-механические свойства цементной матрицы

С целью исследования влияния нанопорошка оксида вольфрама на свойства цементной матрицы были проведены исследования изменения плотности, водопоглощения, пористости и прочности на сжатие в зависимости от содержания фотокатализатора в матрице.

Как видно из результатов исследования (табл. 1), с увеличением содержания порошка оксида вольфрама в цементной матрице наблюдается рост средней плотности, это связано, с более высоким удельным весом высокодисперсных порошков по сравнению с удельным весом цемента и с малыми размерами вольфрамсодержащих частиц, которые способны заполнять пустоты между частицами цемента, тем самым уплотняя структуру.

**Таблица 1. Физико-механические свойства цементной матрицы**  
**Table 1. Physical and mechanical properties of the cement matrix**

Показатель	Содержание добавки в цементной матрице WO <sub>3</sub> , %					
	Контроль	1	2	3	4	5
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1961,43	1976,94	1985,981	1998,29	2016,32	2027,65
Прочность при сжатии, МПа	56,69	67,075	76,6	73,89	70,13	71,11
Водопоглощение по массе, %	6,87	6,1	5,97	6,18	6,12	6,26
Водопоглощение по объему, %	13,47	12,95	11,85	12,34	12,34	12,69
Пористость, %	20,93	16,98	17,2	17,44	18,2	18,26

Максимальное увеличение прочности при сжатии исследуемых образцов на 35% по сравнению с контрольным образцом наблюдается при введении 2 масс.% WO<sub>3</sub>. При увеличении содержания высокодисперсных порошков более 2 масс.% прочность цементного камня снижается, но при этом остаются выше значения прочности контрольного образца. Это может быть связано как с агломерацией частиц порошка, так и с инертностью частиц фотокатализатора по отношению к компонентам вяжущего, в результате чего чрезмерная замена цемента, приводит к снижению прочности на сжатие.

При введении порошка оксида вольфрама наблюдается уменьшение водопоглощения и пористости цементной матрицы, причем наиболее значительное снижение водопоглощения по массе на 11-13%, водопоглощение по объему на 12% наблюдается при содержании 1-2 масс.% WO<sub>3</sub>. Максимальное водопоглощение составило 6,26% при добавлении 5 масс.% WO<sub>3</sub> что на 9 % ниже водопоглощения контрольной смеси.

Общая пористость модифицированных образцов снизилась на 12...19 % по отношению к контрольному образцу, при этом минимальное значение полной пористости наблюдается у образца с содержанием добавки 1-2 % масс.WO<sub>3</sub>. Снижение водопоглощения и пористости в исследуемых модифицированных цементных образцах объясняется тем, что высокодисперсные порошки, действуя как наполнители, заполняют поры и уменьшают доли пустот, тем самым уплотняя микроструктуру цементной матрицы. По мере замены вяжущего вольфрамсодержащими частицами более 2 масс.%, во всех исследуемых цементных матрицах значения пористости и водопоглощения увеличивались, но оставались ниже значения контрольного образца, что, связано с агломерацией высокодисперсных частиц и, следовательно, снижением их способности заполнять поры.

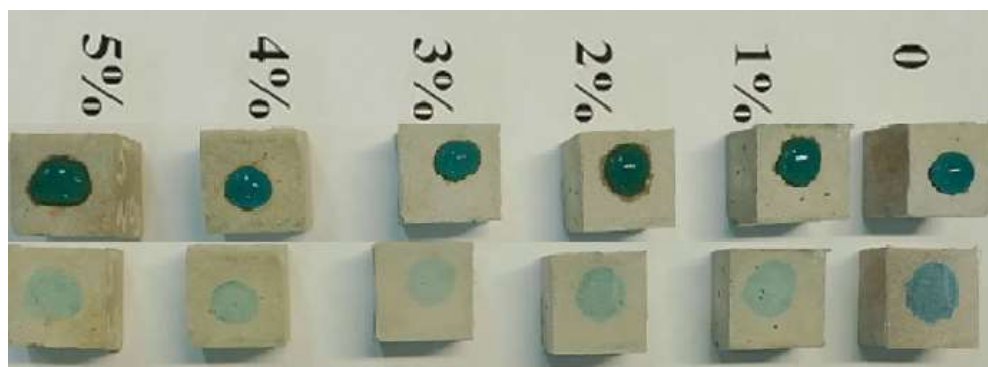
### 4. Визуальная оценка фотокаталитической активности цементных материалов

Визуальный анализ результатов исследования (рис.4) показывает значительное обесцвечивание красителя на цементных образцах, модифицированных порошком WO<sub>3</sub> по сравнению с контрольным образцом. Предположительно это указывает на способность поверхности к самоочищению, результате фотокаталитической активности порошка оксида вольфрама. Однако результаты являются предварительными и требуют подтверждения при дальнейших исследованиях.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, использование высокодисперсного порошка оксида вольфрама, полученного в результате переработки твердых сплавов, в качестве добавки к цементным композициям способствует улучшению физико-механических свойств вяжущего материала и обеспечивает возможность к самоочищению. Это открывает широкие перспективы для производства строительных изделий с самоочищающимися свойствами, однако требует проведения дополнительных исследований. В дальнейших работах планируется изучить способы равномерного распределения частиц в матрице, определить оптимальную концентрацию добавки и исследовать самоочищающиеся свойства модифицированной цементной поверхности.

*Исследование выполнено с использованием оборудования на базе Центра коллективного пользования «Перспективные технологии и материалы» СевГУ*



**Рис. 4.** Изменение интенсивности окраски раствора метилен синего на поверхности цементных образцов, модифицированных добавкой и без, после 3 часов воздействия облучения (фотографии сделаны камерой мобильного телефона)

**Fig. 4.** Change in the intensity of coloring of the methylene blue solution on the surface of cement samples modified with and without an additive after 3 hours of exposure to radiation (photos taken with a mobile phone camera)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darkwah Williams Kweku, Odum, Bismark, Addae Maxwell, Koomson, Desmond, Kwakye Danso Benjamin, Oti-Mensah Ewurabena, Asenso, Theophilus, Buanya Beryl. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming // *Journal of Scientific Research and Reports*. 2018, 17. pp. 1-9.
2. Guanyu Liu, Tianzheng Zhao, Hailiang Fei, Fen Li, Wenya Guo, Zhaolin Yao, Zhen Feng. A review of various self-cleaning surfaces, durability and functional applications on building exteriors // *Construction and Building Materials*, 2023. Vol. 409, p. 134084.
3. Hassaan, M.A., El-Nemr, M.A., Elkatory, M.R. et al. Principles of Photocatalysts and Their Different Applications // *A Review*. *Top Curr Chem (Z)*, 2023, 381. p. 31.
4. Dong Fan, Zhang Yuxin, Zhang Sen, Editorial: Photocatalysis for Environmental Applications // *Frontiers in Chemistry*. 2019, Vol. 7.
5. Seonghun Park, Yesub Keum, Jinhee Park. Ti-based porous materials for reactive oxygen species mediated photocatalytic reactions // *Chem Commun (Camb)*, 2022. 58(5). pp.607-618.
6. Ionut Claudiu Roata, Catalin Croitoru, Alexandru Pascu, Elena Manuela Stanciu. Photocatalytic coatings via thermal spraying: a mini-review // *AIMS Materials Science*, 2019, 6(3). pp. 335-353.
7. Nguyen Dac Dien, Pham Thi Thu Ha, Xuan Hoa Vu, Tran Thu Trang, Trinh Duc Thanh Giang and Nguyen Thi Dung. Developing efficient CuO nanoplate/ZnO nanoparticle hybrid photocatalysts for methylene blue degradation under visible light // *RSC Adv.*, 2023, 13. pp. 24505-24518.
8. Kailun Chen, Fulin Qu, Yuhan Huang, Jack Cai, Fan Wu, Wengui Li, Advancing photocatalytic concrete technologies in design, performance and application for a sustainable future // *Advanced Nanocomposites*, 2024. Vol. 1, Iss. 1, pp. 180-200.
9. Gang Liao, Wu Yao, Anming She, Cheng Shi, Junqing Zuo, Delong Wu. Interfacial design of nano-TiO<sub>2</sub> modified recycled concrete powder for building self-cleaning // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023. Vol. 661, p. 130925.
10. Zhang Weibo, Chen Pinghua, Liu Jun, Huang NanNan, Feng Chenglian, Wu Daishe, Bai Yingchen. Effects of Different Delocalized  $\pi$ -Conjugated Systems Towards the TiO<sub>2</sub>-Based Hybrid Photocatalysts // *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9.
11. Kannappan Panchamoorthy Gopinath, Nagarajan Vikas Madhav, Abhishek Krishnan, Rajagopal Malolan, Goutham Rangarajan. Present applications of titanium dioxide for the photocatalytic removal of pollutants from water: A review // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 270, p. 110906.
12. Tsang Chi, Li Kai, Zeng Yuxuan, Zhao Wei, Zhang Tao, Zhan Yujie, Xie Ruijie, Leung Dennis, Huang Haibao. Titanium oxide based photocatalytic materials development and their role of in the air pollutants degradation // *Overview and forecast. Environment International*.(2019. 125. pp.200-228.
13. Гаврилова М., Гаврилова Д., Евстропиев С., Шелеманов А., Багров И. Пористые керамические нанопорошки ZnO: особенности фотолюминесценции, адсорбции и фотокаталитические свойства // *Керамика*. 2023, 6. С. 1667-1681.
14. Perez Nicolás María, Navarro Iñigo, Fernández J.M., Alvarez José. Atmospheric NOx removal: Study of cement mortars with iron- and vanadium-doped TiO<sub>2</sub> as visible light-sensitive photocatalysts // *Construction and Building Materials*. 2017, 149. pp. 257-271.
15. Xu Yun, Song Xu, Jiang Shumei, Wei Chao-Hai. Enhanced photocatalytic activity of Pt-doped TiO<sub>2</sub> for NOx oxidation both under UV and visible light irradiation: A synergistic effect of lattice Pt<sup>4+</sup> and surface PtO // *Chemical Engineering Journal*. 2015. p. 274.

16. Xiangyu Chen, Lige Qiao, Rixu Zhao, Jianhao Wu, Jingyang Gao, Lan Li, Jinchao Chen, Wen Wang, Melissa G. Galloni, Federico M. Scesa, Zhi Chen, Ermelinda Falletta. Recent advances in photocatalysis on cement-based materials // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, Vol. 11, Iss.2, p. 109416.

17. L. Jing, W.J. Ong, R. Zhang, E. Pickwell-MacPherson, C.Y. Jimmy. Graphitic carbon nitride nanosheet wrapped mesoporous titanium dioxide for enhanced photoelectrocatalytic water splitting // *Catalysis Today*, 2018, 315. pp. 103-109.

18. Quan Haiqin, Gao Yanfeng, Wang Wenzhong. Tungsten oxide-based visible light-driven photocatalysts: Crystal and electronic structures and strategies for photocatalytic efficiency enhancement // *Inorganic Chemistry Frontiers*. 2020, 7. pp. 817-838.

19. N.C. Zheng, T. Ouyang, Y. Chen, Z. Wang, D.Y. Chen, Z.Q. Liu. Ultrathin CdS shell-sensitized hollow S-doped CeO<sub>2</sub> spheres for efficient visible-light photocatalysis // *Catal. Sci. Technol.*, 2019, 9 (6). pp. 1357-1364.

20. L. Wei, Z. Guo, X. Jia. Probing photocorrosion mechanism of CdS films and enhancing photoelectrocatalytic activity via cocatalyst // *Catal. Lett.*, 2021, 151 (1). pp. 56-66.

21. Xu Xuan, Sun Yaofang, Fan Zihong, Zhao Deqiang, Xiong Shimin, Zhang Bingyao, Zhou Shiyu, Liu Guotao. Mechanisms for ·O<sub>2</sub><sup>-</sup> and ·OH Production on Flowerlike BiVO<sub>4</sub> Photocatalysis Based on Electron Spin Resonance // *Frontiers in Chemistry*, 2018. Vol.6.

22. M.G. Galloni, E. Ferrara, E. Falletta, C.L. Bianchi. Olive mill wastewater remediation: from conventional approaches to photocatalytic processes by easily recoverable materials // *Catalysts*, 2022, 12 (8). p. 923.

23. R. He, X. Huang, J. Zhang, Y. Geng, H. Guo. Preparation and evaluation of exhaust-purifying cement concrete employing titanium dioxide // *Materials*, 2019, 12 (13). p. 2182.

24. Han, B., Zhang, L., Ou, J. Photocatalytic Concrete. In: *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. Springer, Singapore. 2017. P. 400.

25. Sun Jinfeng, Tian Liang, Yu Zhuqing, Zhang Yu, Li Chengdong, Hou Guihua, Shen Xiaodong. Studies on the size effects of nano-TiO<sub>2</sub> on Portland cement hydration with different water to solid ratios // *Construction and Building Materials*. 2020, 259. p. 120390.

26. M. Janus, S. Mađraszewski, K. Zając, E. Kusiak-Nejman, A.W. Morawski, D. Stephan, D. Photocatalytic activity and mechanical properties of cements modified with TiO<sub>2</sub>/N // *Materials*, 2019, 12 (22). p. 3756.

27. Патент на изобретение «Способ получения нанодисперсных порошков» 2763814 С1, 11.01.2022. Заявка № 2021102205 от 29.01.2021

## REFERENCES

1. Darkwah Williams Kweku, Odum, Bismark, Addae Maxwell, Koomson, Desmond, Kwakye Danso Benjamin, Oti-Mensah Ewurabena, Asenso, Theophilus, Buanya Beryl. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming // *Journal of Scientific Research and Reports*. 2018, 17. pp. 1-9.

2. Guanyu Liu, Tianzheng Zhao, Hailiang Fei, Fen Li, Wenya Guo, Zhaolin Yao, Zhen Feng. A review of various self-cleaning surfaces, durability and functional applications on building exteriors // *Construction and Building Materials*, 2023. Vol. 409, p. 134084.

3. Hassaan, M.A., El-Nemr, M.A., Elkatory, M.R. et al. Principles of Photocatalysts and Their Different Applications // *A Review*. *Top Curr Chem (Z)*, 2023, 381. p. 31.

4. Dong Fan, Zhang Yuxin, Zhang Sen, Editorial: Photocatalysis for Environmental Applications // *Frontiers in Chemistry*. 2019, Vol. 7.

5. Seonghun Park, Yesub Keum, Jinhee Park. Ti-based porous materials for reactive oxygen species mediated photocatalytic reactions, // *Chem Commun (Camb)*, 2022. 58(5). pp.607-618.

6. Ionut Claudiu Roata, Catalin Croitoru, Alexandru Pascu, Elena Manuela Stanciu. Photocatalytic coatings via thermal spraying: a mini-review // *AIMS Materials Science*, 2019, 6(3). pp. 335-353.

7. Nguyen Dac Dien, Pham Thi Thu Ha, Xuan Hoa Vu<sup>c</sup>, Tran Thu Trang, Trinh Duc Thanh Giang and Nguyen Thi Dung. Developing efficient CuO nanoplate/ZnO nanoparticle hybrid photocatalysts for methylene blue degradation under visible light // *RSC Adv.*, 2023, 13. pp. 24505-24518.

8. Kailun Chen, Fulin Qu, Yuhan Huang, Jack Cai, Fan Wu, Wengui Li, Advancing photocatalytic concrete technologies in design, performance and application for a sustainable future // *Advanced Nanocomposites*, 2024. Vol. 1, Iss. 1, pp. 180-200.

9. Gang Liao, Wu Yao, Anming She, Cheng Shi, Junqing Zuo, Delong Wu. Interfacial design of nano-TiO<sub>2</sub> modified recycled concrete powder for building self-cleaning // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023. Vol. 661, p. 130925.

10. Zhang Weibo, Chen Pinghua, Liu Jun, Huang NanNan, Feng Chenglian, Wu Daishe, Bai Yingchen. Effects of Different Delocalized  $\pi$ -Conjugated Systems Towards the TiO<sub>2</sub>-Based Hybrid Photocatalysts // *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9.

11. Kannappan Panchamoorthy Gopinath, Nagarajan Vikas Madhav, Abhishek Krishnan, Rajagopal Malolan, Goutham Rangarajan. Present applications of titanium dioxide for the photocatalytic removal of pollutants from water: A review // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 270, p. 110906.

12. Tsang Chi, Li Kai, Zeng Yuxuan, Zhao Wei, Zhang Tao, Zhan Yujie, Xie Ruijie, Leung Dennis, Huang Haibao. Titanium oxide based photocatalytic materials development and their role of in the air

- pollutants degradation // Overview and forecast. *Environment International*. 2019. 125. pp.200-228.
13. Gavrilova M., Gavrilova D., Evstropiev S., Shelemanov A., Bagrov I. Porous Ceramic ZnO Nanopowders: Features of Photoluminescence, Adsorption and Photocatalytic Properties // *Ceramics*. 2023, 6. pp. 1667-1681.
14. Perez Nicolás María, Navarro Iñigo, Fernández J.M., Alvarez José. Atmospheric NOx removal: Study of cement mortars with iron- and vanadium-doped TiO<sub>2</sub> as visible light-sensitive photocatalysts // *Construction and Building Materials*. 2017, 149. pp. 257-271.
15. Xu Yun, Song Xu, Jiang Shumei, Wei Chao-Hai. Enhanced photocatalytic activity of Pt-doped TiO<sub>2</sub> for NOx oxidation both under UV and visible light irradiation: A synergistic effect of lattice Pt<sup>4+</sup> and surface PtO // *Chemical Engineering Journal*. 2015. p. 274.
16. Xiangyu Chen, Lige Qiao, Rixu Zhao, Jianhao Wu, Jingyang Gao, Lan Li, Jinchao Chen, Wen Wang, Melissa G. Galloni, Federico M. Scesa, Zhi Chen, Ermelinda Falletta. Recent advances in photocatalysis on cement-based materials // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, Vol. 11, Iss.2, p. 109416.
17. L. Jing, W.J. Ong, R. Zhang, E. Pickwell-MacPherson, C.Y. Jimmy. Graphitic carbon nitride nanosheet wrapped mesoporous titanium dioxide for enhanced photoelectrocatalytic water splitting // *Catalysis Today*, 2018, 315. pp. 103-109.
18. Quan Haiqin, Gao Yanfeng, Wang Wenzhong. Tungsten oxide-based visible light-driven photocatalysts: Crystal and electronic structures and strategies for photocatalytic efficiency enhancement // *Inorganic Chemistry Frontiers*. 2020,7. pp. 817-838.
19. N.C. Zheng, T. Ouyang, Y. Chen, Z. Wang, D.Y. Chen, Z.Q. Liu. Ultrathin CdS shell-sensitized hollow S-doped CeO<sub>2</sub> spheres for efficient visible-light photocatalysis // *Catal. Sci. Technol.*, 2019, 9 (6). pp. 1357-1364.
20. L. Wei, Z. Guo, X. Jia. Probing photocorrosion mechanism of CdS films and enhancing photoelectrocatalytic activity via cocatalyst // *Catal. Lett.*, 2021, 151 (1). pp. 56-66.
21. Xu Xuan, Sun Yaofang, Fan Zihong, Zhao Deqiang, Xiong Shimin, Zhang Bingyao, Zhou Shiyu, Liu Guotao. Mechanisms for ·O<sub>2</sub><sup>-</sup> and ·OH Production on Flowerlike BiVO<sub>4</sub> Photocatalysis Based on Electron Spin Resonance // *Frontiers in Chemistry*, 2018. Vol.6.
22. M.G. Galloni, E. Ferrara, E. Falletta, C.L. Bianchi. Olive mill wastewater remediation: from conventional approaches to photocatalytic processes by easily recoverable materials // *Catalysts*, 2022, 12 (8). p. 923.
23. R. He, X. Huang, J. Zhang, Y. Geng, H. Guo. Preparation and evaluation of exhaust-purifying cement concrete employing titanium dioxide // *Materials*, 2019, 12 (13). p. 2182.
24. Han, B., Zhang, L., Ou, J. Photocatalytic Concrete. In: *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. Springer, Singapore. 2017. P. 400.
25. Sun Jinfeng, Tian Liang, Yu Zhuqing, Zhang Yu, Li Chengdong, Hou Guihua, Shen Xiaodong. Studies on the size effects of nano-TiO<sub>2</sub> on Portland cement hydration with different water to solid ratios // *Construction and Building Materials*. 2020, 259. p. 120390.
26. M. Janus, S. Mađraszewski, K. Zajac, E. Kusiak-Nejman, A.W. Morawski, D. Stephan, D Photocatalytic activity and mechanical properties of cements modified with TiO<sub>2</sub>/N // *Materials*, 2019, 12 (22). p. 3756.
27. Patent for the invention "Method for producing nanodisperse powders" 2763814 C1, 11.01.2022. Application No. 2021102205 dated 01/29/2021

## MODIFICATION OF THE CEMENT MATRIX WITH A HIGHLY DISPERSED WO<sub>3</sub> TUNGSTEN OXIDE POWDER WITH PHOTOCATALYTIC PROPERTIES

Gavrish V.M.<sup>1</sup>, Chayka T.V.<sup>1</sup>, Korsak D.V.<sup>1</sup>, Chayka A.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sevastopol State University

Address: 299053, 33 Universitetskaya str., Sevastopol

<sup>2</sup> St. Petersburg Mining University, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

Address: 199106, St. Petersburg, line 21-ya V.O., house 2

**Abstract** The paper presents the results of the study of photocatalytic activity under visible light of highly dispersed tungsten oxide powder WO<sub>3</sub> obtained as a result of recycling of carbide products. Microstructural analysis of the tungsten oxide powder using scanning electron microscopy (SEM) before and after the photocatalysis process was performed. Test results of physical and mechanical properties (density, compressive strength, water absorption, total porosity) of cement matrix with different content of WO<sub>3</sub> powder (1-5 wt.%) are presented. Preliminary analysis of the modified surface for self-cleaning properties was carried out.

**Subject:** Cement matrix modified by photocatalyst based on highly dispersed tungsten oxide powder WO<sub>3</sub>.

**Materials and methods:** Highly dispersed tungsten oxide powder (average particle size 40 to 200 nm) was used as a photocatalyst. Photocatalytic activity of WO<sub>3</sub> powder was evaluated by determining the degree of degradation of model organic pollutant methylene blue with a concentration of 15 mg/L by photometric analysis of the solution using the device "Expert 003" at a wavelength of 654 nm. The microstructure of tungsten oxide powder was investigated on a PHENOM proX scanning electron microscope. Portland cement CEM II/A-P 42.5H SS was used for the fabrication of cement matrices with photocatalyst. Physical and mechanical properties of cement samples were determined according to standard methods of GOST 30744-2001, GOST 30744-2001.

**Results:** The results showed that the photocatalytic activity of tungsten oxide powder increases with increasing its concentration in solution and time of irradiation with visible light. The maximum degradation of 89% dye, was observed when 5.0 g/l WO<sub>3</sub> powder was added, 180 min after the start of the reaction. Addition of tungsten oxide powder to cement matrix leads to increase in density, compressive strength, decrease in water absorption and total porosity. Visual analysis of organic dye discoloration on the surface of the modified cement matrix is presumably related to the self-cleaning ability of the surface due to the photocatalytic properties of tungsten oxide.

**Conclusions:** The use of highly dispersed tungsten oxide powder in cement matrices has great potential to create self-cleaning building materials with improved physical and mechanical properties as well as the ability to decompose polluting organic substances under the influence of visible light.

**Key words:** photocatalysis, high-dispersed powder, tungsten trioxide, cement material, self-cleaning, strength.



УДК 544.723

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
УГОЛЬНЫХ АДСОРБЕРОВГусенцова Я.А.<sup>1</sup>, Красногрудов А.В.<sup>2</sup>, Родыгина М.М.<sup>3</sup>, Высоцкая Н.Д.<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»  
291034, Луганская Народная Республика, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А<sup>4</sup>Институт «Агротехнологическая академия», ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
295492, Республика Крым, г. Симферополь, п. АграрноеE-mail: <sup>1</sup>gusentsova@gmail.com, <sup>2</sup>krasnogrudov@mail.ru, <sup>3</sup>sunsara\_06@mail.ru, <sup>4</sup>natali.v-v@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена изучению гидравлических свойств угольных адсорберов, используемых в различных промышленных процессах. Рассмотрены их назначение и области применения. Основное внимание уделено экспериментальному определению коэффициентов гидравлического сопротивления, которые являются ключевыми параметрами для моделирования и оптимизации работы адсорбционных систем.

Разработана и изготовлена экспериментальная установка, подобраны приборы для определения основных параметров для определения гидравлических характеристик угольных адсорберов. В ходе исследования были проведены эксперименты по измерению гидравлического сопротивления угольных адсорберов при различных условиях эксплуатации. Использовались различные параметры, варьировались параметры потока рабочей среды, такие как скорость и давление. Полученные данные позволили определить зависимости гидравлического сопротивления от этих параметров и выявить оптимальные условия для работы адсорберов.

Результаты исследования показывают, что пористость и структура угольных адсорберов существенно влияют на их гидравлические характеристики. Экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления для различных типов адсорберов, что важно для оптимизации процессов фильтрации и сепарации. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими моделями, что позволило уточнить существующие модели и предложить новые подходы к расчету гидравлических характеристик.

Полученные экспериментальные данные позволяют с одной стороны уточнить математические модели процесса адсорбции, с другой стороны определить адекватность имеющихся моделей.

В заключение, подчеркивается важность экспериментальных исследований для понимания и оптимизации гидравлических характеристик угольных адсорберов. Полученные результаты могут быть полезны для разработки новых и улучшения существующих адсорбционных систем, что имеет большое значение для различных отраслей промышленности, где используются угольные адсорберы.

**Предметом исследования** являются гидравлические характеристики угольных адсорберов. Основное внимание уделяется экспериментальному определению коэффициентов гидравлического сопротивления пористых тел, используемых в установках вакуумной сепарации.

**Материалы и методы:** в экспериментах использована различные адсорбционные материалы, конструктивные элементы фильтров различных типов и размеров. Подробно описаны их физические свойства, а также условия подготовки и проведения экспериментов.

Использована специально спроектированная и изготовленная экспериментальная установка, контрольно-измерительная аппаратура и методики для определения гидравлических характеристик, включающие методы экспериментального определения коэффициентов гидравлического сопротивления, а также методики анализа полученных данных.

**Результаты:** экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления для различных типов наполнителей угольных адсорберов. Эти данные важны для оптимизации процессов фильтрации и сепарации.

Исследовано влияние структуры угольных адсорберов на их гидравлические характеристики. Выявлено, что более пористые материалы демонстрируют меньшие значения гидравлического сопротивления.

Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими моделями, что позволило уточнить существующие модели и предложить новые подходы к расчету гидравлических характеристик

**Выводы:** проведенные эксперименты позволили получить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления фильтроэлемента в зависимости от основных его геометрических и гидравлических параметров, на основе которых рассчитать гидравлическое сопротивление адсорбера при заданной геометрии, как самого фильтра, так и фильтрующего материала, расхода воздуха через него, или определить площадь фильтрующей поверхности при заданном расходе, перепаде давления и характеристиках фильтрующего элемента. Последние данные могут служить основой для выбора вентилятора для системы очистки.

Отметим также, что гидравлическое сопротивление адсорбера существенно влияет на эффективность вентиляционной системы, особенно если система включает в себя вентиляторы, фильтры и другие элементы, которые создают сопротивление потоку воздуха.

**Ключевые слова:** адсорбер, фильтр, гидравлическое сопротивление, эффективность.

## ВВЕДЕНИЕ

Угольные адсорберы – это устройства, предназначенные для удаления загрязняющих

веществ из газов или жидкостей с использованием активированного угля как адсорбента. Адсорбция – это процесс, при котором молекулы загрязнителей прилипают к поверхности адсорбента [3, 6, 13].

Основными компонентами угольных адсорберов являются адсорбент – активированный уголь и камера адсорбции в которой происходит процесс очитки. Газы или жидкости, содержащие загрязнители, проходят через эту камеру, в которой уголь проводит процесс адсорбции.

Угольные адсорберы находят применение в различных областях, таких как водоочистка, очистка воздуха, обработка промышленных газов и другие процессы, требующие удаления загрязнителей из газов или жидкостей [8, 12].

Угольные адсорберы играют важную роль в обеспечении безопасности жизнедеятельности, особенно в контексте защиты от вредных газов, паров и других токсичных веществ. Эти устройства используются для очистки воздуха от вредных примесей, что может быть критически важно в различных областях, таких как промышленность, медицина, аварийно-спасательные операции и т.д. [11, 13]

Вот несколько областей применения угольных адсорберов в контексте обеспечения безопасности жизнедеятельности: защита от ядовитых газов, защита от химически опасных паров; в различных производственных секторах, таких как производство пластмасс, красок, резин и т.д., где могут образовываться токсичные пары и газы. Угольные адсорберы используются для удаления этих вредных веществ, содействуя поддержанию безопасных условий для рабочих [7, 8].

В медицинских средах угольные адсорберы могут применяться для очистки воздуха от анестетиков и других медицинских газов, предотвращая их негативное воздействие на персонал и пациентов.

Важно правильно подбирать и обслуживать угольные адсорберы, чтобы обеспечить их эффективную работу и обеспечить безопасность в рабочих условиях [12, 15].

Гидравлические характеристики угольных адсорберов могут варьироваться в зависимости от конкретного применения и конструкции системы, таких как: проходимость – свойство характеризует способность среды пропускать жидкость или газ через свою структуру; гидравлическое сопротивление. Скорость фильтрации – скорость, с которой проходит жидкость или газ через угольный адсорбер, также может влиять на его эффективность, поскольку высокие скорости могут привести к недостаточной адсорбции загрязнений. Модуль проницаемости – этот коэффициент измеряет способность материала пропускать жидкость или газ и может быть важным параметром для определения гидравлических характеристик угольного адсорбента [5, 11].

Уточнение конкретных гидравлических характеристик для определенного типа угольного адсорбента лучше всего проводить согласно технической документации или рекомендациям производителя.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Исследование гидравлических характеристик угольных адсорберов, используемых в различных промышленных процессах, может проводиться с использованием различных методов и приборов [9, 10].

При выборе метода проведения экспериментов важно учитывать конкретные характеристики адсорбера, условия эксплуатации и цели исследования. Комбинированный подход, включающий в себя несколько методов, может предоставить более полное представление о гидравлических характеристиках угольных адсорберов [7, 10].

Гидравлическое сопротивление в системе угольных адсорберов обычно связано с потоком жидкости через их внутреннюю структуру. Угольные адсорберы используются для очистки газов или жидкостей от загрязнителей, путем адсорбции этих загрязнителей на поверхности активированного угля [3, 5].

Гидравлическое сопротивление зависит от нескольких факторов, включая размер и форму гранул угля, его упаковку в адсорбере, концентрацию загрязнителей, скорость потока жидкости и другие параметры процесса [1, 4].

Для оценки гидравлического сопротивления угольных адсорберов часто используют различные инженерные методы, такие как измерение давления в системе при различных условиях работы. Также проводят моделирование гидравлического процесса с использованием компьютерных программ, что позволяет предсказывать изменения давления и оптимизировать работу угольных адсорберов.

В общем случае гидравлическое сопротивление проточной части адсорбера складывается из сопротивления входа, сопротивления угольной крошки и сопротивления выхода по тока фильтруемой среды. И, если методы по уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления входа и выхода достаточно полно отработаны, то сопротивление слоя угольной крошки требует уточнения ввиду того, что крупность и форма зерен крайне неоднородна, и использование существующих справочных данных может привести к существенным ошибкам при проектировании фильтров [4, 9, 15]. В связи с этим определение гидравлических характеристик целесообразно провести опытным путем.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой выполненных исследований является ряд научных работ отечественных и зарубежных исследователей в данной области и результаты, полученные авторами в процессе выполнения работы.

В экспериментах использована различные адсорбционные материалы, конструктивные элементы фильтров различных типов и размеров.

Подробно описаны их физические свойства, а также условия подготовки и проведения экспериментов.

Использована специально спроектированная и изготовленная экспериментальная установка, контрольно-измерительная аппаратура и методики для определения гидравлических характеристик. Включены методы экспериментального определения коэффициентов гидравлического сопротивления, а также методики анализа полученных данных.

Основным методом исследования, использованный авторами, является метод экспериментального исследования [4, 7, 10]. Он включает ряд этапов постановка цели и задач, разработка плана эксперимента, которая включает выбор методов и контрольно-измерительной аппаратуры, и условий проведения эксперимента, проведение эксперимента, обработка полученных данных, их анализ и интерпретация результатов, формулирование выводов на основе анализа данных и разработка рекомендаций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В работе поставлена задача - установить гидравлические характеристики отдельных элементов и всего пакета фильтра на основе слоя из угольной крошки. Пакет состоит из элементов конструкции удерживающих угольную крошку в определенном объеме и самого слоя угольной крошки. К конструктивным элементам относятся металлические сетки различного типа и различной величины ячеек, фильтрующие материалы.

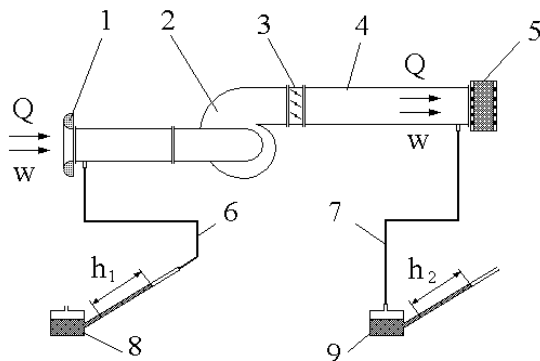
К гидравлическим характеристикам фильтрующих элементов относятся такие параметры как [11, 3]:

- перепад давления на адсорбере (потери давления, затрачиваемые на преодоление гидравлического сопротивления при прохождении потока через все элементы фильтрующего слоя, а также через устройства подвода и отвода рабочего тела);
- величина скорости или расхода рабочего тела через адсорбер.

Характер связи между этими параметрами зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются: толщина слоя угольной крошки, размер зерен угольной крошки; режим течения рабочего тела; распределение скорости движения рабочего тела во всем объеме адсорбера [6, 11].

Имея в виду конкретные условия применения и предполагаемую конструкцию, определение гидравлических характеристик выполнено на чистом воздухе.

Принципиальная схема аэродинамического стенда для исследования гидравлических характеристик приведена на рис.1. Для измерения расхода воздуха через фильтроэлемент 5 служит лемниската 1. Центробежный вентилятор 2 всасывает воздух через лемнискату 1 и подает его по трубопроводу 4 на исследуемый фильтроэлемент. Расход воздуха  $Q$  и соответственно скорость  $w$  можно изменять при помощи заслонок 3.



**Рис. 1.** Схема стенда для определения гидравлических характеристик угольных фильтров (1 – расходомерное устройство (лемниската); 2 – вентилятор; 3 – заслонки для изменения расхода воздуха; 4 – выравнивающий участок; 5 – фильтропакет; 6 и 7 – пневмотрубки; 8 – микроманометр для измерения разрежения за лемнискатой; 9 – микроманометр для измерения избыточного давления перед фильтропакетом)

**Fig. 1.** Diagram of the stand for determining the hydraulic characteristics of carbon filters (1 – flow meter (lemniscate); 2 – fan; 3 – dampers for changing air flow; 4 – leveling section; 5 – filter pack; 6 and 7 – pneumatic tubes; 8 – micromanometer for measuring the vacuum behind the lemniscate; 9 – micromanometer to measure the excess pressure before the filter package)

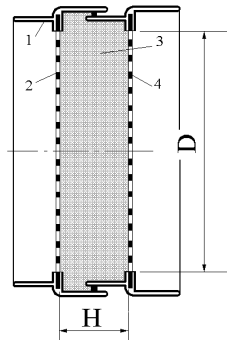
Лемниската служит для определения расхода воздуха, с этой целью за лемнискатой при помощи микроманометра 7 измеряется величина понижения

давления (перепад  $h_1$ ). Трубопровод 3 предназначен для выравнивания профиля скорости воздуха перед фильтром. Непосредственно перед фильтром при

помощи микроманометра 8 измеряется давление в потоке воздуха (перепад  $h_2$ ).

Конструкция фильтроэлемента показана на рис.2. Между двумя сетками завальцованными в

корпусе круглой формы и диаметром сечения в свету  $D = 180$  мм засыпана угольная крошка определенной крупности. Толщина слоя  $H$  может регулироваться в пределах от 10 до 50 мм.



**Рис. 2.** Схема фильтроэлемента и фильтрующие сетки (1 – корпус, 2 – сетка на входе, 3 – засыпка угольной крошкой, 4 – сетка на выходе)

**Fig. 2.** Diagram of the filter element and filter grids (1 – housing, 2 – inlet grid, 3 – filling with coal chips, 4 – outlet grid)

Подготовка угольной крошки к эксперименту состояла из двух этапов:

- калибровка угольной крошки по величине зерен;
- промывка угольной крошки проточной водой на мелком сите с целью удаления мелкой угольной пыли;
- сушка угольной крошки.

Калибровка угольной крошки по величине зерен выполнялась путем последовательного просеивания крошки через 2 сита, сначала через сито с размером ячеек, соответствующих нижнему пределу выбранного диапазона, затем через сито с ячейками по верхнему диапазону. Таким образом, были подготовлены 4 партии образцов угольной крошки с размерами зерен: 1-ая партия – с размерами от 0,5 мм до 1мм; 2-ая партия – с размерами от 1 мм до 2 мм; 3-ая партия – с размерами от 2 мм до 3мм; 4-ая партия – с размерами от 3 мм до 4 мм.

Общее выражение для расчета потерь давления на любом гидравлическом местном сопротивлении записывается следующим образом [4]:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\rho$  – плотность рабочей среды, кг/м<sup>3</sup> (в нашем случае – воздух);

$w$  – скорость движения рабочей среды, м/с.

Эксперименты проводились в следующей последовательности:

- продувка отдельно сеток, которые использовались в фильтроэлементах (продувки 4-х сеток по отдельности и их комбинаций);

- продувки фильтроэлементов, собранных по схеме на рис.2, при различных расходах воздуха (скорости воздуха от 0,1 до 0,6 м/с), различной крупности угольной крошки (1-ая партия – 4-ая партия) и при разных толщинах угольного слоя (от 10 мм до 50 мм).

Расход воздуха  $Q$  и его скорость  $w$  в угольном слое и в сетках определялись по показаниям микроманометра, измеряющего понижение давления за лемнискатой по сравнению с атмосферным давлением:

$$Q = \mu \frac{\pi D_I^2}{4} k_1 \sqrt{h_1}; \quad w = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода лемнискаты, по результатам предварительной тарировки  $\mu = 0,95$ ;

$D_I$  – диаметр проходного сечения лемнискаты.

Так как расход воздуха в экспериментах изменялся в широких пределах использовались лемнискаты разного диаметра  $D_I = 168 \dots 28$  мм;

$h_1$  – разрежение за лемнискатой по показаниям микроманометра в м. вод. ст.

Используя найденное значение скорости движения воздуха в элементах адсорбера, определен коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\zeta = \frac{\rho_g g h_2}{\rho w^2}, \quad (3)$$

где  $\rho_g$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$h_2$  – избыточное давление перед фильтроэлементом, м. вод. ст.

Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя угольной крошки различной крупности от скорости течения воздуха при толщине слоя  $H = 50$  мм**Table 1.** Dependence of the coefficient of hydraulic resistance of a layer of coal chips of various sizes on the air flow velocity at a layer thickness of  $H = 50$  mm

w, скорость движения рабочей среды, м/с	Размеры зерен угольной крошки $d_3$ , мм			
	0,5 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4
	Коэффициент гидравлического сопротивления фильтроэлемента $\zeta$			
0,1	4,8	1,5	0,7	0,5
0,2	3,85	1,1	0,55	0,45
0,3	2,55	0,8	0,5	0,4
0,4	2,3	0,75	0,4	0,35
0,5	1,85	0,7	0,3	0,3
0,6	1,75	0,6	0,25	0,25

## ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты позволили получить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления фильтроэлемента в зависимости от основных его геометрических и гидравлических параметров. Эти данные позволяют рассчитать гидравлическое сопротивление адсорбера при заданной геометрии, как самого фильтра, так и фильтрующего материала, расхода воздуха через него, или определить площадь фильтрующей поверхности при заданном расходе, перепаде давления и характеристиках фильтрующего элемента. Последние данные могут служить основой для выбора вентилятора для системы очистки.

Отметим также, что гидравлическое сопротивление адсорбера существенно влияет на эффективность вентиляционной системы, особенно если система включает в себя вентиляторы, фильтры и другие элементы, которые создают сопротивление потоку воздуха.

Адсорберы, обычно применяемые для очистки воздуха от загрязнителей, могут создавать дополнительное гидравлическое сопротивление из-за своей структуры и материалов. Это может привести к увеличению потерь давления в системе вентиляции. Потери давления могут снизить эффективность вентиляторов и увеличить энергопотребление системы.

Если гидравлическое сопротивление адсорбера слишком велико, может потребоваться использование более мощных вентиляторов для обеспечения необходимого объема воздушного потока. Это, в свою очередь, может привести к увеличению энергопотребления системы.

В целом, баланс между эффективностью очистки воздуха и гидравлическим сопротивлением является важным аспектом проектирования и эксплуатации вентиляционных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974. 279 с.

2. Буренин В.В. Защита атмосферного воздуха от производственной пыли, токсичных газов и паров // Экология и промышленность России. 2004. №9. С. 25 – 29.

3. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Штокман Е.А., Шилов В.А., Новгородский Е.Е. и др., под ред. Штокмана Е.А. Ростов на Дону.: Новая книга. М.: АСВ. 1999. 688 с.

4. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение. 1983. 351 с.

5. Диффузионные процессы в технических устройствах: монография / Андрийчук Н.Д., Насонкина И.К., Коваленко А.А. Луганск: Изд. ВНУ им. В. Даля. 2008. 240 с.

6. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН. 1999. 470 с.

7. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд.). 1974. 480 с.

8. Проскурина И.И., Свергузова С.В., Василевич Н.Н. Активированный уголь как средство очистки газовых выбросов при производстве фриക്ഷонных изделий // Экология и промышленность России. 2006. №5. С.19 – 21.

9. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях Пер. с англ. М.: Энергия. 1979. 408 с.

10. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432.

11. Товбин Ю.К. Молекулярная теория адсорбции в пористых телах. М.: Физматлит, 2012. 623 с. ISBN 978-5-9221-1431-8.

12. Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнений по международным стандартам. Справочник. 2-е изд, перераб.и доп. М.: Протектор, 2002. 432с.

13. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. Paul A. Baron, Kenneth Willeke) - AEROSOL MEASUREMENT Principles, Techniques, and Applications Third Edition Edited. Pergamon Press, 1993.

14. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A.P.Khomyakov, S.Mordanov, A.S.Lavrov, D.I.Grinyov //IOPConferenceSeries Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 062020.

15. Handbook of Nonwoven Filter Media (редактор: Irwin M. Hutten) - Handbook of Nonwoven Filter Media (2nd Edition) Author(s) / Editor(s) Hutten, Irwin M. Publisher Elsevier Copyright / Publication Date 2019.

## REFERENCES

1. Bradshaw P. introduction to turbulence and its measurement. M.: Mir, 1974. 279 pp.

2. Burenin V.V. Protection of atmospheric air from industrial dust, toxic gases and vapors//Eco-logic and industry of Russia. 2004. №9. S. 25 – 29.

3. Ventilation, air conditioning and purification at food industry enterprises/Shtokman E.A., Shilov V.A., Novgorodsky E.E. et al., ed. Shtokman E.A. Rostov on Don.: New book. M.: DIA. 1999. 688 p.

4. I. E. Idelchik. Aerohydrodynamics of process devices (Inlets, outlet and flow distribution along the section of devices). M.: Mechanical engineering. 1983. 351 pp.

5. Diffuzionnye processy v tekhnicheskikh ustrojstvah: monografiya / Andriychuk N.D., Nasonkina I.K., Kovalenko A.A. Lugansk: Izd. VNU im. V. Dalya. 2008. 240 s.

6. Karnaukhov A.P. Adsorption. Texture of dispersed and porous materials. Novosibirsk: Science. Sib. enterprise of the Russian Academy of Sciences. 1999. 470 s.

7. Povkh I.L. Aerodynamic experiment in mechanical engineering. L.: "Mechanical Engineering" (Leningrad. departmental). 1974. 480 s.

8. Proskurina I.I., Sverguzova S.V., Vasilevich N.N. Activated carbon as a means of cleaning gas emissions in the production of friction products//Ecology and industry of Russia. 2006. No. 5.S.19 – 21.

9. Reynolds AJ Turbulent Currents in Engineering Applications Per. from English M.: Energy. 1979. 408 pp.

10. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. M.: Science, 1987. 432.

11. Tovbin Y.K. Molecular theory of adsorption in porous bodies. M.: Fizmatlit, 2012. 623 pp. ISBN 978-5-9221-1431-8.

12. Fomin G.S., Fomina O.N. Air. Pollution control according to international standards. Handbook. 2nd ed., revised and add. M.: Protector, 2002. 432s.

13. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. Paul A. Baron, Kenneth Willeke) - AEROSOL MEASUREMENT Principles, Techniques, and Applications Third Edition Edited. Pergamon Press, 1993.

14. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A.P.Khomyakov, S.Mordanov, A.S.Lavrov, D.I.Grinyov //IOPConferenceSeries Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 062020.

15. Handbook of Nonwoven Filter Media (редактор: Irwin M. Hutten) - Handbook of Nonwoven Filter Media (2nd Edition) Author(s) / Editor(s) Hutten, Irwin M. Publisher Elsevier Copyright / Publication Date 2019.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF COAL ADSORBERS

Gusentsova<sup>1</sup> Ya, A., Krasnogradov<sup>2</sup> A.V., Rodygina<sup>3</sup> M.M., Vysotskaya<sup>4</sup> N.D.

<sup>1,2,3</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk Vladimir Dahl State University»

<sup>4</sup> V.I. Vernadsky Crimean Federal University"

295492, Republik of Crimea, Simferopol, village Agrarnoe.

E-mail: <sup>1</sup>gusentsova@gmail.com, <sup>2</sup>krasnogradov@mail.ru, <sup>3</sup>sunsara\_06@mail.ru, <sup>4</sup>natali.v-v@mail.ru

**Abstract.** The article is devoted to the study of hydraulic properties of carbon adsorbers used in various industrial processes. Their purpose and areas of application are considered. The main attention is paid to the experimental determination of hydraulic resistance coefficients, which are key parameters for modeling and optimizing the operation of adsorption systems. An experimental setup was developed and manufactured, devices were selected to determine the main parameters for determining the hydraulic characteristics of carbon adsorbers. During the study, experiments were carried out to measure the hydraulic resistance of carbon adsorbers under various operating conditions. Various parameters were used, the parameters of the working medium flow, such as speed and pressure, varied. The obtained data made it possible to determine the dependences of hydraulic resistance on these parameters and identify the optimal conditions for the operation of adsorbers. The results of the study show that the porosity and structure of carbon adsorbers significantly affect their hydraulic characteristics. The hydraulic resistance coefficients for various types of adsorbers were experimentally determined, which is important for optimizing filtration and separation processes. A comparative analysis of experimental data with theoretical models was carried out, which made it possible to refine existing models and propose new approaches to calculating hydraulic characteristics.

The obtained experimental data make it possible, on the one hand, to refine mathematical models of the adsorption process, and on the other hand, to determine the adequacy of existing models.

In conclusion, the importance of experimental studies for understanding and optimizing the hydraulic characteristics of carbon adsorbers is emphasized. The results obtained can be useful for developing new and improving existing adsorption systems, which is of great importance for various industries where carbon adsorbers are used.

**The subject of the study** is the hydraulic characteristics of carbon adsorbers. The main attention is paid to the experimental determination of the hydraulic resistance coefficients of porous bodies used in vacuum separation units.

**Materials and methods:** various adsorption materials, structural elements of filters of various types and sizes were used in the experiments. Their physical properties, as well as the conditions for preparing and conducting the experiments, are described in detail.

A specially designed and manufactured experimental setup, control and measuring equipment and methods for determining the hydraulic characteristics, including methods for experimentally determining the hydraulic resistance coefficients, as well as methods for analyzing the obtained data, were used.

**Results:** the hydraulic resistance coefficients for various types of carbon adsorber fillers were experimentally determined. These data are important for optimizing filtration and separation processes.

The effect of the structure of carbon adsorbers on their hydraulic characteristics was studied. It was revealed that more porous materials demonstrate lower hydraulic resistance values. A comparative analysis of experimental data with theoretical models was carried out, which made it possible to refine existing models and propose new approaches to calculating hydraulic characteristics.

**Conclusions:** the experiments made it possible to obtain the dependence of the coefficient of hydraulic resistance of the filter element depending on its main geometric and hydraulic parameters, on the basis of which it is possible to calculate the hydraulic resistance of the adsorber for a given geometry of both the filter itself and the filter material, the air flow through it, or to determine the area of the filtering surface for a given flow rate, pressure drop and characteristics of the filter element. The latter data can serve as a basis for selecting a fan for the cleaning system.

It should also be noted that the hydraulic resistance of the adsorber significantly affects the efficiency of the ventilation system, especially if the system includes fans, filters and other elements that create resistance to the air flow.

**Key words:** adsorber, filter, hydraulic resistance, efficiency.



## Раздел 4. Экологическая безопасность

УДК 624.131.5

### МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА В ПРОЦЕССЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В.

Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»  
 Адрес: 295492, Республика Крым, г. Симферополь, п. Аграрное  
 e-mail: Chens\_mu1@mail.ru, EllaLit@mail.ru

**Аннотация.** В статье предлагается модель сейсмического сигнала, основанного на использовании теории случайных функций. Для исследования характеристик любой системы математическими методами, включая и машинные, должна быть обязательно проведена формализация этого процесса, то есть построена математическая модель. Центральное место уделено математическому описанию движения частиц грунта в реальном процессе их колебаний. С этой целью используются вероятностные методы представления случайных функций в виде гармонических рядов, спектрального разложения дисперсии случайного процесса. Данный подход к моделированию сейсмического сигнала носит дискуссионный характер, так как известно, что структура сейсмического сигнала определяется механизмом очага и закономерностями процесса распространения сигналов сейсмических волн в упругом полупространстве. Главным в статье является развитие метода оценки параметров движения частиц грунта, определяющих силовое воздействие на строительное сооружение на основе модели нерегулярного волнового процесса. Вместе с тем, сейсмический сигнал всегда осложнен фоном механических шумов, носящих характер случайного процесса.

**Предмет исследования.** Математическое описание движения частиц грунта в реальном процессе их колебаний.

**Материалы и методы.** Общая теория волновых процессов для моделирования движения грунта. Вероятностные методы представления случайных функций в виде гармонических рядов, спектрального разложения дисперсии случайного процесса.

**Результаты.** Разработанная методика расчета параметров нерегулярных волновых процессов апробирована при изучении влияния волнения моря на движущиеся объекты.

**Выводы.** Развитие метода оценки параметров движения частиц грунта, определяющих силовое воздействие на строительное сооружение на основе модели нерегулярного волнового процесса, дает возможность получить объективную оценку физических явлений и процессов на этапе оценки прочностных характеристик объектов в процессе их эксплуатации.

**Ключевые слова:** стационарность случайных процессов, корреляционная функция, спектральная плотность, нормированная спектральная плотность, спектр случайного процесса, надежность строительных конструкций.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем современной науки является разработка и внедрение в практику методов исследования динамики функционирования систем. Надежным инструментом в изучении этих вопросов является метод математического моделирования, который позволяет решать весьма сложные задачи.

На практике часто встречаются случайные процессы, обладающие важным свойством – стационарностью, вероятностные свойства которого не зависят от начала отсчета времени  $t$ . Свойством стационарности обладают установившиеся процессы вдали от переходных режимов. К их числу вполне возможно отнести процессы, достаточной длительности во времени. Свойство стационарности существенно упрощает весь аппарат теории случайных процессов. Так у стационарного процесса средняя и дисперсия есть постоянные числа.

Установившийся случайный процесс обладает еще одним существенным свойством – ординаты его распределяются по нормальному закону. Эти законы полностью определяются средними значениями и корреляционными моментами.

Моделирование колебаний основания связано с вопросами теории подобия [1]. Динамическое подобие процессов требует рассмотрения

некоторых ряда необходимых и достаточных условий подобия, обусловленных влиянием времени, плотности материалов, вязкости, трения и в их взаимодействии с другими факторами, определяющих исследуемое явление в поведении системы.

Соблюдение динамического подобия принципиально возможно, если для сил любого происхождения – инерциальных, сил тяжести, вязкости, упругих, а также реактивных, в обеих сравнительных системах при динамическом процессе соблюдается постоянное и одинаковое отношение.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Существенное развитие механика грунтов получила в работах ученых русской школы: Н. П. Пузыревского (1923), Н. М. Герсеванова (1931), Н. А. Цыговича (1934), В. А. Флорина (1936), В. В. Соколовского (1942), К. Е. Егорова (1948), В. Г. Березанцева (1948). [2].

Проблеме поведения грунтов при динамических нагрузках уделяли большое внимание Е.А. Вознесенский, В.Т. Трофимов, В.Г. Коваленко, О.В. Зеркаль, В.А. Калачев, Е.Н. Самарин, В.Л. Шипков и др., а также такие зарубежные ученые, как Й. Вейд, М. Новаку, В. Финн и др. [3]

В соответствии с [4] при значениях фазовых скоростей распространения сейсмических волн до 400 м/с теперь необходимо учитывать волновой характер сейсмического воздействия. Инженерный анализ с учетом волновых сейсмических эффектов подразумевает применение интегральной дилатационно-ротационной или дифференцированной моделей движения грунта и получение соответствующих этим моделям расчетных параметров сейсмической нагрузки. Если фундамент податливый, а воздействие длинноволновое (доминирующие длины сейсмических волн многократно превосходят размеры фундамента), то интегральная модель также применима. Модель дифференцированного движения грунта принимается в случаях, когда одновременно сочетаются два фактора [5–7]:

1) в спектре воздействия преобладают короткие волны с малыми длинами (по сравнению с размерами фундамента);

2) здание или сооружение имеет податливый фундамент или установлено на дискретных опорах.

В [5–7] рассматривается применение линейно-спектрального метода при дифференцированном сейсмическом воздействии.

Для расчетов динамических нагрузок от близко расположенных неглубоких очагов землетрясений, когда в спектре воздействия преобладают поперечные волны, следует использовать методику моделирования Сиды–Идрисса [3].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для установившихся случайных процессов корреляционная функция имеет вид затухающей косинусоиды (рисунок 1).

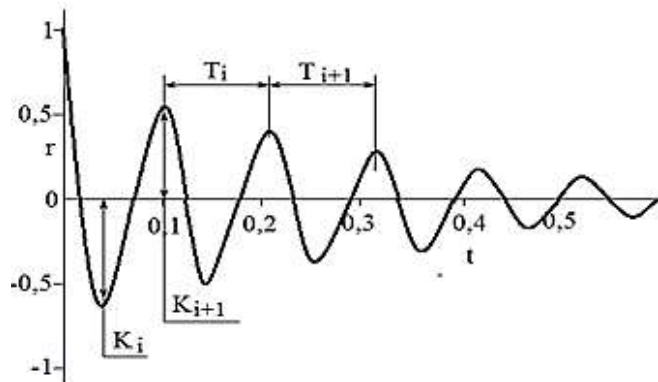


Рис. 1. Корреляционная функция стационарного случайного процесса  
Fig. 1. Correlation function of a stationary random process

Затухающая косинусоида такого типа хорошо аппроксимируется формулой

$$K_x(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (1)$$

которая широко используется на практике. Входящие в (1) величины  $\alpha$  и  $\beta$  имеют размерность частоты ( $1/c$ ) и связаны с характеристиками корреляционной функции  $K_x(\tau)$ ,  $D_x$  – дисперсия.

Пусть  $T_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  есть периоды  $K_x(\tau)$ . Средний период корреляционной функции будет равен

$$T_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (2)$$

Величина  $\beta$  представляет собой среднюю частоту корреляционной функции

$$\beta = \frac{2\pi}{T_{cp}}, \quad (3)$$

параметр  $\alpha$  является ее коэффициентом затухания.

Обозначим  $v_i$  – логарифмический декремент затухания соседних экстремумов  $K_i$  и  $K_{i+1}$

$$v_i = \ln \left| \frac{K_i}{K_{i+1}} \right|. \quad (4)$$

Средний декремент затухания будет

$$v_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (5)$$

В этом случае параметр  $\alpha$  определяется выражением

$$\alpha = \frac{v_{cp}}{T_{cp}/2} = v_{cp} \frac{2}{T_{cp}} \frac{\pi}{\pi} = v_{cp} \frac{\beta}{\pi}. \quad (6)$$

Для физически одинаковых случайных процессов отношение  $\alpha/\beta = v_{cp}/\pi$  оказывается довольно устойчивым.

Для учета начального сдвига фазы кривой  $K_x(\tau)$  Фирсовым Г. А. [8] предложена следующая формула для описания случайного процесса

$$K_x(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \beta \tau - \frac{\alpha \beta}{2\alpha^2 + \beta^2} \sin \beta |\tau| \right). \quad (7)$$

На практике весьма полезной оказывается еще одна характеристика стационарных случайных процессов, которую называют их спектральной плотностью. Для выяснения смысла этой

характеристики рассмотрим вначале некоторую неслучайную функцию  $X(t)$ . Эту функцию можно представить в виде суммы отдельных гармоник с частотами  $\omega_i$  и амплитудами  $A_i$  и  $B_i$ :

$$X(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t). \quad (8)$$

Величины  $A_0, A_i, B_i$  находятся как коэффициенты ряда Фурье. Выражение (8) можно записать в виде

$$X(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (9)$$

где  $C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \varphi_i = \arctg(B_i/A_i)$ .

Спектром функции  $X(t)$  называют функцию, определяющую зависимость амплитуд  $C_i$  от частот  $\omega_i$ . Эта функция характеризует внутреннюю структуру неслучайного процесса  $X(t)$ .

Теперь рассмотрим стационарный случайный процесс  $X(t)$ . Доказано, что такой процесс можно разложить также на элементарные гармоники с частотами  $\omega_i$  и амплитудами  $u_i$  и  $v_i$ , которые в отличие от неслучайной функции будут случайными величинами. Таким образом, всякий стационарный случайный процесс можно представить в виде

$$X(t) = m_x + \sum_{i=1}^n (u_i \cos \omega_i t + v_i \sin \omega_i t), \quad (10)$$

где  $m_x$  – среднее процесса. Процесс (10) будет стационарным в широком смысле при соблюдении следующих условий:

- средние значения случайных величин равны нулю  $m_{u_i} = m_{v_i} = 0$ ;
- дисперсии случайных величин одинаковы  $D_{u_i} = D_{v_i} = D_i$ ;
- величины  $u_i$  и  $v_i$  не коррелированы, при каждом  $i$   $K_{u_i v_i} = 0$ .

Представление  $X(t)$  в форме (10) при соблюдении перечисленных условий называется каноническим разложением случайного процесса.

Дисперсия процесса (10) по теореме о дисперсии суммы некоррелированных случайных величин находится следующим образом [9–12]

$$D_x = \sum_{i=0}^n (D_{u_i} \cos^2 \omega_i t + D_{v_i} \sin^2 \omega_i t) = \sum_{i=0}^n D_i, \quad (11)$$

то есть равна сумме дисперсий амплитуд элементарных гармоник.

Имея в виду непрерывность частот  $\omega_i$ , удобно рассмотреть частоты на равных интервалах  $\Delta\omega$  и ввести понятие плотности дисперсии

$$S_x(\omega_i) = \frac{D_i}{\Delta\omega}. \quad (12)$$

Здесь  $S_x(\omega_i)$  – средняя дисперсия на интервале частот  $\omega_i \leq \omega \leq \omega_{i+1}$ . На основании (11) будем иметь.

$$D_x = \sum_{i=0}^n D_i = \sum_{i=0}^n S_x(\omega_i) \Delta\omega. \quad (13)$$

Перейдя к пределу  $\Delta\omega \rightarrow 0, n = \infty$ ,  $\omega$  будет непрерывным параметром. Получим

$$D_x = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (14)$$

Непрерывная функция  $S_i(\omega)$  называется спектральной плотностью случайного стационарного процесса. Функции  $S_x(\omega)$  и  $K_x(\tau)$  связаны друг с другом косинус-преобразованием Фурье

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau. \quad (15)$$

Нормированной спектральной плотностью называют функцию

$$s_x(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{D_x}. \quad (16)$$

Очевидно

$$\int_0^{\infty} s_x(\omega) d\omega = 1. \quad (17)$$

Используя зависимость (15) для корреляционной функции (7) можно получить

$$S_x(\omega) = D_x \frac{4}{\pi} \frac{\alpha b^2}{2\alpha^2 + \beta^2} \frac{\omega^2 + \alpha^2}{\omega^4 + 2\alpha^2\omega^2 + b^4}, \quad (18)$$

где  $a^2 = \alpha^2 - \beta^2, b^2 = \alpha^2 + \beta^2$ . Частота  $\omega_1$  максимума функции (18) определяется из уравнения

$$\frac{dS_x(\omega)}{d\omega} = 0. \quad (19)$$

$$\omega_1 = \beta \sqrt{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha^2}{\beta^2}} - \frac{\alpha^2}{\beta^2}}. \quad (20)$$

С учетом того, что  $\alpha/\beta \approx 0,2$  будем иметь

$$\omega_1 \approx 1,02\beta, \quad (21)$$

то есть частота максимума спектра приблизительно равна средней частоте корреляционной функции. Это обстоятельство часто используют при рассмотрении спектров случайных процессов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

По формуле (18) может быть построен спектр волнового процесса, если заданы параметры его корреляционной функции  $\alpha$  и  $\beta$ , а также известна дисперсия  $D_x$  [11–12]. Покажем это на примере хорошо изученного волнения моря. На рисунке 2 приведены нормированные спектры для различной бальности волнения моря 8, 6 и 4 балла (соответственно кривые 1, 2, 3). Как видно, с уменьшением интенсивности волнения частота максимума спектра  $\omega_i$  смещается вправо.

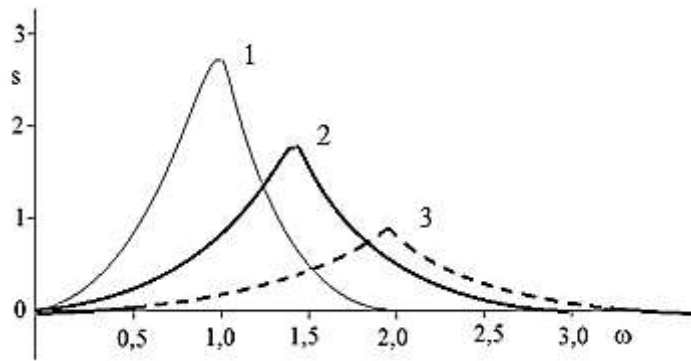


Рис. 2. Нормированные спектры случайных процессов  
 Fig. 2. Normalized spectra of random processes

В случае двумерного волнения спектр будет одномерным,  $S_x(\omega)$  зависит только от частоты  $\omega$ .

Существенным для характеристики спектра является его площадь

$$D_B = \int_0^{\infty} S_B(\omega) d\omega. \quad (22)$$

Дисперсия  $D_B$  связана с интенсивностью волнения. Она возрастает с увеличением амплитуды волнения.

Ширина спектра волнения характеризуется параметром  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \left( 1 - \frac{[\int_0^{\infty} \omega^2 S_B(\omega) d\omega]^2}{\int_0^{\infty} \omega^4 S_B(\omega) d\omega} \right)^{1/2} \quad (23)$$

Если  $\varepsilon \leq 0,4$ , то спектр называют узким, а функция  $s_B(\omega)$  сосредоточена вблизи одной частоты. При широком спектре, когда  $\varepsilon \geq 0,4$ ,  $s_B(\omega)$  распределена в более широком диапазоне частот  $\omega$ . Выражение формы спектра в виде

$$s_B(\omega) = \frac{S_B(\omega)}{D_B}$$

удобно для подбора аппроксимирующих функций.

При этом дисперсия  $D_B$  служит масштабом спектра  $S_B(\omega)$  при заданной функции  $s_B(\omega)$ .

Как правило, в большинстве практических случаев отношение

$$\frac{\alpha}{\beta} = v_{cp} \frac{1}{\pi} \quad (24)$$

носит довольно устойчивый характер и колеблется вблизи  $\alpha/\beta \approx 0,21 \div 0,22$ . Это позволяет назначать один из параметров (например,  $\beta$ ) и определять второй приближенно по (24).

Как было показано выше, волновые случайные процессы достаточно хорошо описывается корреляционной функцией (7), которая имеет спектр (18).

Для данного спектра характерно наличие ординат при  $\omega = 0$  и  $\omega = \infty$ . При  $\omega = 0$  имеем

$$S_B(0) = \frac{4}{\pi} D_B \frac{\alpha b^2}{2\alpha^2 + \beta^2} \frac{\alpha^2}{b^4}. \quad (25)$$

При  $\omega = \beta$  получим

$$S_B(\beta) = \frac{4}{\pi} D_B \frac{\alpha b^2}{2\alpha^2 + \beta^2} \frac{b^2}{\alpha^4 + 4\alpha^2 \beta^2}. \quad (26)$$

Эта ордината равна максимальной. Рассмотрим отношение

$$\frac{S_B(0)}{S_B(\beta)} = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^4 \frac{4 + \frac{\alpha^2}{\beta^2}}{\left(1 + \frac{\alpha^2}{\beta^2}\right)^3}. \quad (27)$$

Если  $\alpha/\beta = 0,2$ , то  $S_B(0) = 0,0056 \cdot S_B(\beta)$ . Как видно, ордината спектра при  $\omega = 0$  достаточно мала. При  $\omega \rightarrow \infty$  спектр (18) быстро затухает. Таким образом, для оценки волновых процессов достаточно рассматривать только существенную часть спектра. Что касается расположения спектра по оси частот, то, как отмечалось, оно определяется частотой его максимума  $\omega_1$ . При  $\alpha/\beta = 0,2$   $\omega_1$  отличается от  $\beta$  на  $1 \div 2\%$ . Поэтому практически считают, что частота максимумов спектра (18)  $\omega_1 = \beta$ , то есть равна средней частоте корреляционной функции  $K_B(\tau)$  (7).

Параметр  $\alpha$  определяет ширину спектра. Чем меньше  $\alpha$ , тем ближе процесс волнения сходится к регулярному и тем уже его спектр. Его ординаты будут более сосредоточены вблизи частоты  $\omega = \beta$ .

Вопрос о том, на какую динамическую нагрузку должны рассчитываться строительные сооружения, является наиболее сложным и противоречивым в процессе проектирования. Бесспорно, что основным принципом при решении этого вопроса должно быть максимальное приближение расчетных параметров к реально возможным, причем наиболее тяжелым. В этом отношении вероятностные методы обладают несомненными преимуществами, так как они позволяют при случайном характере внешнего воздействия учесть их реальные вероятностные законы вместо условного выбора отдельных возможных значений или реализаций.

С целью обеспечения высокой надежности строительных конструкций их проектирование следует производить исходя из такого режима

сейсмической нагрузки, который может быть встречен в процессе эксплуатации и является наиболее тяжелым в отношении внешних сил, действующих на сооружение [12].

После выбора волнового процесса и его параметров программируется расчет нормированной спектральной плотности для ряда дискретных значений  $\omega_i$ . Как показывает опыт, интервал частот выбирается от  $\omega = 0$  до  $\omega \leq 1,6$ , с дискретностью  $\Delta\omega = 0,2$ . Использование нормированной спектральной плотности удобно с той точки зрения, что она не зависит от дисперсии реального волнения.

$$s(\omega) = \frac{4}{\pi} \frac{ab^2}{2\alpha^2 + \beta^2} \frac{\omega^2 + \alpha^2}{\omega^4 + 2\alpha^2\omega^2 + d^4}. \quad (28)$$

Каждому значению частоты  $\omega_i$  соответствует дисперсия  $i$ -ой элементарной волны

$$\sigma_i^2 = D_B s(\omega_i) \Delta\omega, \quad \sigma_i \sqrt{s(\omega_i) \Delta\omega}. \quad (29)$$

Ординаты частиц поверхности грунта в заданных направлениях рассчитываются как сумма элементарных гармоник [11]

$$x_B = \sum_{i=1}^{\infty} (u_i \cos \omega_i t + v_i \sin \omega_i t) \sigma_i. \quad (30)$$

Скорости и ускорения частиц грунта рассчитываются по формулам

$$v_{xB} = \dot{x}_B = \sum_{i=1}^{\infty} (-u_i \sin \omega_i t + v_i \cos \omega_i t) \omega_i \sigma_i, \quad (31)$$

$$\dot{v}_{xB} = \ddot{x}_B = - \sum_{i=0}^{\infty} (u_i \cos \omega_i t + v_i \sin \omega_i t) \omega_i^2 \sigma_i$$

В этих формулах  $u_i$  и  $v_i$  – случайные величины с нормальным нормированным распределением, у которых математические ожидания равны нулю, а дисперсии единице.

В последующем бесконечный ряд гармоник заменяется на конечное их значение, так как дисперсии элементарных волн при больших частотах  $\omega > 2,0$  стремятся к нулевому значению.

## ВЫВОДЫ

Главным в статье является развитие метода оценки параметров движения частиц грунта, определяющих силовое воздействие на строительное сооружение на основе модели нерегулярного волнового процесса. Такой подход дает возможность получить объективную оценку физических явлений и процессов на этапе оценки прочностных характеристик объектов в процессе их эксплуатации.

Методика моделирования процессов нерегулярного движения грунта при землетрясениях основана на теории случайных процессов. Если дисперсия волн постоянна при заданной активности землетрясения, то волновой процесс обладает свойством стационарности. Это свойство позволяет представить случайный процесс движения грунта в виде суммы отдельных его

гармоник с распределением общей дисперсии волны на составляющие, в зависимости от выбора корреляционной функции волнения и его спектральной плотности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемодуров В. Т. Моделирование систем: монография / В. Т. Чемодуров, Э. В. Литвинова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 236 с.

2. Пьянков С. А. Механика грунтов: учебное пособие / С. А. Пьянков, З. К. Азизов; Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 103 с.

3. Динамика грунтов: учебное пособие / сост. Л. А. Строкова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 190 с.

4. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\* (с Изменением №1).

5. Назаров Ю. П., Позняк Е. В., Симбиркин В. Н., Курнавин В. В. Расчет конструкций линейно-спектральным методом при дифференцированном сейсмическом движении грунта, заданном акселерограммами // Вестник НИЦ «Строительство». – 2021. – № 1 (28). – С. 92–101.

6. Назаров Ю. П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия / Ю. П. Назаров. – М.: Наука, 2010. – 468 с.

7. Назаров Ю. П. Расчетные параметры волновых полей сейсмических движений грунта / Ю. П. Назаров. – М.: Наука, 2015. – 401 с.

8. Фирсов Г. А. Об энергетическом спектре морского волнения // Труды центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. – 1958. – Вып. 127. – С. 3–16.

9. Екимов В. В. Вероятностные методы в строительной механике корабля / В. В. Екимов. – Л.: «Судостроение», 1966. – 328 с.

10. Свешников А. А. Определение вероятностных характеристик трехмерного волнения моря // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Механика и машиностроение. – 1959. – № 3.

11. Глеб К. А. Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных буев традиционной формы // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 57–65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65.

12. Благовещенский С. Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля / С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – Л.: «Судостроение», 1976. – 176 с.

## REFERENCES

1. SChemodurov V. T. System modeling: Monograph / V. T. SChemodurov, E. V. Litvinova. – Simferopol': IT «ARIAL», 2016. – 236 p.

2. P'yankov S. A. Soil mechanics: Textbook / S. A. P'yankov, Z. K. Azizov; Ul'yan. gos. tekhn. un-t. – Ul'yanovsk: UIGTU, 2008. – 103 p.

3. Dynamics of soils: Textbook / Comp. L. A. Strokova; Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2018. – 190 p.
4. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Actualized edition SNiP II-7-81\* (with a change №1).
5. Nazarov YU. P., Poznyak E. V., Simbirkin V. N., Kurnavin V. V. Calculation of structures by the linear-spectral method with a differentiated seismic movement of the soil set by accelerograms // Vestnik NIC «Stroitel'stvo». – 2021. – № 1 (28). – Pp. 92–101.
6. Nazarov YU. P. The analytical foundations of calculating structures on seismic influences / YU. P. Nazarov. – M.: Nauka, 2010. – 468 p.
7. Nazarov YU. P. Calculated parameters of the wave fields of seismic soil movements / YU. P. Nazarov. – M.: Nauka, 2015. – 401 p.
8. Firsov G. A. On the energy spectrum of marine excitement // Proceedings of the Central Research Institute. Academician A.N. Krylova. – 1958. – Issue. 127. – Pp. 3–16.
9. Ekimov V. V. Probable methods in the construction mechanics of the ship / V. V. Ekimov. – L.: «Sudostroenie», 1966. – 328 p.
10. Sveshnikov A. A. Determination of probabilistic characteristics of three-dimensional sea waves // Izv. USSR ACADEMY OF SCIENCES. Dep. tech. sciences. Mechanics and mechanical engineering. – 1959. – № 3.
11. Gleb K. A. Method for determining the curvature of sea waves using conventional wave-measuring buoys // Izv. Universities of Russia. Radio electronics. – 2020. – T. 23, №. 4. – Pp. 57-65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65.
12. Blagoveshchensky S. N. Handbook on the statics and dynamics of the ship. In two volumes. Ed. 2nd, revised. and Vol. 2. Dynamics (pitching) of the ship / S. N. Blagoveshchensky, A. N. Kholodilin. – L.: «Sudostroenie» 1976. – 176 p.

## SOIL MOVEMENT MODEL DURING SEISMIC ACTIVITY

Chemodurov V. T., Litvinova E. V.

Institute «Agrotechnological academy» V.I. Vernadsky Crimean Federal University,  
Address: 295492, Republik of Crimea, Simferopol, village Agrarnoe.  
Chens\_mu1@mail.ru, EllaLit@mail.ru

**Abstract.** The article proposes a model of a seismic signal based on the use of the theory of random functions. To study the characteristics of any system by mathematical methods, including machine methods, it is necessary to formalize this process, that is, a mathematical model is built. The central place is given to a mathematical description of the motion of soil particles in the real process of their oscillations. To this end, probabilistic methods are used to represent random functions in the form of harmonic series, a spectral decomposition of the dispersion of a random process. This approach to modeling a seismic signal is controversial, since it is known that the structure of a seismic signal is determined by the source mechanism and the laws of the process of propagation of seismic wave signals in an elastic half-space. The main thing in the article is the development of a method for estimating the motion parameters of soil particles that determine the force effect on a building structure based on an irregular wave process model. At the same time, the background of mechanical noise always complicates the seismic signal, which is a random process.

**Subject.** Mathematical description of the motion of soil particles in the real process of their oscillations.

**Materials and methods.** General wave process theory for ground motion modeling. Probabilistic methods for representing random functions as harmonic series, spectral decomposition of the variance of a random process.

**Results.** The developed methodology for calculating the parameters of irregular wave processes was tested when studying the effect of sea waves on moving objects.

**Conclusions.** The development of the method of estimating the motion parameters of soil particles that determine the force impact on a building structure based on the irregular wave process model makes it possible to obtain an objective assessment of physical phenomena and processes at the stage of assessing the strength characteristics of objects during their operation.

**Key words:** stationarity of random processes, correlation function, spectral density, normalized spectral density, spectrum of random process, reliability of building structures.

СПИСОК АТОРОВ

Альчиков Р.Л.	аспирант, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.
Андреев В.М.,	обучающийся, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Бекиров О.С.	обучающийся, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Бекиров Э.А	д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Богущая А.Ю	обучающийся, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Бородин С.С.,	главный инженер ООО «Актив Групп», г. Симферополь
Воскресенская С.Н.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Высоцкая Н.Д.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Гавриш В.М.	кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Гусенцова Я.А.	д.т.н., профессор, Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск
Дворецкий А.Т	д.т.н., Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Завалий А.А.	д.т.н., Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Козодаева В.С.	обучающийся, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Корсак Д.В.	обучающийся, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Красногрудов А.В	к.т.н., Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск
Куртбединова М.Э.	аспирант, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.
Литвинова Э.В.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
Макарова Е.С.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь
Нагаева З.С.	Доктор архитектуры, директор АНО Центр научно-инновационного развития архитектуры и искусства, г. Симферополь
Перминов Д.А.	к.т.н., доцент, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.
Родыгина М.М	к.т.н., Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск
Свириденко Д.А.	обучающийся, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Федоркин С.И.	д.т.н., Крымский федеральный университет им. Вернадского, г. Симферополь.
Царёва О.С.	к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург
Чайка А.К.	обучающийся, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Чайка Т.В.	заведующий лабораторией, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Чаплыгин В.А.	обучающийся, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь.
Чемодуров В.Т.	д.т.н., профессор Академии строительства и архитектуры, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Шаленный В.Т.	д.т.н., профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
Шубин И. Л.	д.т.н., директор Научно-исследовательский институт строительной физики, г. Москва

## 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.

Прием статей на рассмотрение и рецензирование через онлайн систему приема статей производится на сайте журнала по адресу: <https://stroyjournal-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.

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 [ger\\_bilenko@cfuv.ru](mailto:ger_bilenko@cfuv.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 [ger\\_bilenko@cfuv.ru](mailto:ger_bilenko@cfuv.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 – работодателем 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 [ger\\_bilenko@cfuv.ru](mailto:ger_bilenko@cfuv.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 [ger\\_bilenko@cfuv.ru](mailto:ger_bilenko@cfuv.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 [ger\\_bilenko@cfuv.ru](mailto:ger_bilenko@cfuv.ru) сканированным 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.

**Язык статьи:** русский, английский.

**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 В5 (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 of research):** 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 **четырех 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.