

ISSN 1997-0935 (Print)  
ISSN 2304-6600 (Online)  
vestnikmgsu.ru

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал  
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 7/2023  
Vol. 18 Issue

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction  
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7

ISSN 1997-0935 (Print)  
ISSN 2304-6600 (Online)  
<http://vestnikmgsu.ru>

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 7  
2023**

Основан в 2005 году,  
1-й номер вышел в сентябре 2006 г.  
Выходит ежемесячно

Сквозной номер 176

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 7  
2023**

Founded in 2005,  
1st issue was published in September, 2006.  
Published monthly

«Вестник МГСУ» — рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре, целями которого являются формирование открытого информационного пространства для обмена результатами научных исследований и мнениями в области строительства между российскими и зарубежными исследователями; привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным и интересным направлениям строительной науки и практики, теории и истории градостроительства, архитектурного творчества.

В основных тематических разделах журнала публикуются оригинальные научные статьи, обзоры, краткие сообщения, статьи по вопросам применения научных достижений в практической деятельности предприятий строительной отрасли, рецензии на актуальные публикации

## Тематические рубрики

- Архитектура и градостроительство. Реконструкция и реставрация
- Проектирование и конструирование строительных систем. Строительная механика. Основания и фундаменты, подземные сооружения
- Строительное материаловедение
- Безопасность строительства и городского хозяйства
- Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство
- Инженерные системы в строительстве
- Технология и организация строительства. Экономика и управление в строительстве
- Краткие сообщения. Дискуссии и рецензии. Информация

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Периодичность:</b>	12 раз в год
<b>Учредители:</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
<b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
<b>Издатель:</b>	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Типография:</b>	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
<b>Сайт журнала:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Тел.:</b>	(495) 287-49-14, доб. 24-76
<b>Подписка и распространение:</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	26.07.2023.
<b>Подписан в свет</b>	28.07.2023.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,29. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 203

## Главный редактор

*Валерий Иванович Теличенко*, академик, первый вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, почетный президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Заместители главного редактора

*Армен Завенович Тер-Мартirosян*, д-р техн. наук, проректор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

*Вера Владимировна Галишикова*, д-р техн. наук, доц., проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакционная коллегия

**Елена Анатольевна Король**, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. жилищно-коммунального комплекса, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Павел Алексеевич Акимов**, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Петр Банахук**, д-р, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

**Александр Тевьетевич Беккер**, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., директор инженерной школы, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Дальневосточная региональная организация Российской академии архитектуры и строительных наук, Владивосток, Российская Федерация

**Виталий Васильевич Беликов**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии речных бассейнов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

**Александр Михайлович Белостоцкий**, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, научный руководитель, Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Х.Й.Х. Броуэрс**, д-р инж. (технические науки, строительные материалы), проф., Технический университет Эйндховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

**Йост Вальравен**, д-р инж. (технические науки, железобетонные конструкции), проф., Технический университет Дельфта, Королевство Нидерландов

**Николай Иванович Вагин**, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Йозеф Вичан**, д-р (технические науки, железобетонные конструкции), проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

**Забигнев Войчицки**, д-р (строительная механика), проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

**Катажина Гладышевска-Федорук**, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

**Милан Голицки**, д-р (технические науки, строительные конструкции), проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

**Петр Григорьевич Грабовый**, д-р экон. наук, проф., зав. каф. организации строительства и управления недвижимостью, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Станислав Емиоло**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

**Армен Юрьевич Казарян**, д-р искусствоведения, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, и.о. директора института архитектуры и градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Россия

**Рольф Катценбах**, д-р инж., проф., Технический университет Дармштадт, Федеративная Республика Германия

**Дмитрий Вячеславович Козлов**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Марта Косор-Казербук**, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

**Сергей Владимирович Кузнецов**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

**Аркадий Николаевич Ларионов**, д-р экон. наук, проф., зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Руда Лийас**, канд. экон. наук, проф., Таллинский технический университет, Эстония

**Июсса Галеевна Лукманова**, д-р экон. наук, проф., проф. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Левон Рафаэлович Манлян**, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, проф. каф. автомобильных дорог, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Николай Павлович Осмоловский**, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт системных исследований Польской академии наук, Варшава, Республика Польша

**Андрей Будимирович Пономарев**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Российская Федерация

**Мирослав Премров**, д-р, проф., Мариборский университет, Республика Словения

**Светлана Васильевна Самченко**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Владимир Николаевич Сидоров**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** Анна Александровна Дядичева

**Редактор:** Татьяна Владимировна Бердникова

**Корректор:** Оксана Валерьевна Ермихина

**Дизайн и верстка:** Александр Дмитриевич Федотов

**Перевод на английский язык:** Ольга Валерьевна Юденкова

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

## Председатель редакционного совета

*Александр Романович Туснин*, д-р техн. наук, проф., зав. каф. металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакционный совет

**Юрий Владимирович Алексеев**, д-р архитектуры, проф., проф. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Николай Владимирович Баничук**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

**Игорь Андреевич Бондаренко**, д-р архитектуры, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, директор, Филиал Федеральное государственное бюджетное учреждение «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

**Наталья Григорьевна Верстина**, д-р экон. наук, проф., зав. каф. менеджмента и инноваций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Александр Николаевич Власов**, д-р техн. наук, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

**Владимир Геннадьевич Гагарин**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

**Нина Васильевна Данилина**, д-р техн. наук, зав. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Олег Васильевич Кабанцев**, д-р техн. наук, доц., директор научно-технических проектов, проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Михаил Николаевич Кирсанов**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Российская Федерация

**Елена Юрьевна Куликова**, д-р техн. наук, проф. каф. строительства подземных сооружений и шахт, каф. инженерной защиты окружающей среды, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», Москва, Российская Федерация

**Леонид Семенович Ляхович**, д-р техн. наук, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

**Рашид Абдуллович Мангушев**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего обра-

зования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Владимир Львович Мондрус**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. строительной и теоретической механики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Андрей Александрович Морозенко**, д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Надежда Сергеевна Никитина**, канд. техн. наук, проф. каф. механики грунтов и геотехники, старший научный сотрудник, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Владимир Александрович Орлов**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Россия

**Петр Ян Паль**, д-р, проф., Технический университет Берлина, Федеративная Республика Германия

**Олег Григорьевич Примин**, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научным исследованиям, АО «Мосводоканал-НИИпроект», Москва, Российская Федерация

**Станислав Владимирович Соболев**, д-р техн. наук, проф., проректор, зав. каф. гидротехнических и транспортных сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», Нижний Новгород, Российская Федерация

**Михаил Юрьевич Слесарев**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Юрий Андреевич Табунщиков**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, проф. и зав. каф. инженерного оборудования зданий и сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), Москва, Российская Федерация

**Владимир Ильич Травуш**, д-р техн. наук, проф., акад. и вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, зам. генерального директора, главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

**Виктор Владимирович Тур**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии бетона, Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь; проф., Белостокский технологический университет, Белосток, Республика Польша

**Наталья Витальевна Федорова**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. архитектурно-строительного проектирования, НИУ МГСУ, директор Мытищинского филиала НИУ МГСУ, Мытищи, Российская Федерация

**Наталья Николаевна Федорова**, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

**Наталья Юрьевна Яськова**, д-р экон. наук, проф., зав. каф. инвестиционно-строительного бизнеса, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

# VESTNIK <sup>MGSU</sup>

Monthly Journal on Construction and Architecture

Vestnik MGSU is a peer-reviewed scientific and technical journal whose aims are to publish and disseminate the results of Russian and foreign scientific research to ensure a broad exchange of scientific information, form an open information cluster in the field of construction science and education, enhance the international prestige of Russian construction science and professional education of various levels, introduce innovative technologies in the processes of training professional and scientific personnel in the construction industry and architecture.

The main thematic sections of the journal publish original scientific articles, reviews, brief reports, articles on the application of scientific achievements in the educational process and practical activity of enterprises in the construction industry, reviews of current publications.

## Thematic sections

- Architecture and Urban Planning. Reconstruction and Refurbishment
- Construction System Design and Layout Planning. Construction Mechanics. Bases and Foundations, Underground Structures
- Construction Material Engineering
- Safety of Construction and Urban Economy
- Hydraulics. Geotechnique. Hydrotechnical Construction
- Engineering Systems in Construction
- Technology and Organization of Construction. Economics and Management in Construction
- Short Messages. Discussions and Reviews. Information

<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Publication Frequency:</b>	Monthly
<b>Founders:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
<b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b>	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
<b>Publisher:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Printing House:</b>	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
<b>Website journal:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Subscription:</b>	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
<b>Signed for printing:</b>	26.07.2023

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2023

## Editor-in-Chief

*Valery Ivanovich Telichenko*, Academician, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

## Deputy Editor-in-Chief

*Armen Z. Ter-Martirosyan*, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

*Vera V. Galishnikova*, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

## Editorial Board

**Elena A. Korol**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Pavel A. Akimov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Piotr Banaszuk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

**Alexander T. Bekker**, Far Eastern Federal University, Far Eastern Regional Branch of Russian Federation Academy of Architecture and Construction Sciences, Vladivostok, Russian Federation

**Vitaliy V. Belikov**, Water Problems Institute of Russian Federation Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Aleksandr M. Belostotskiy**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**H.J.H. Brouwers**, Eindhoven University of Technology, Kingdom of the Netherlands

**Arkady N. Larionov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Inessa G. Lukmanova**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Levon R. Mailyan**, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

**Petr G. Grabovyy**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Milan Holický**, Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic

**Stanislav Jemiolo**, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Republic of Poland

**Rolf Katzenbach**, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

**Armen Yu. Kazaryan**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Marta Kosior-Kazberuk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

**Dmitry V. Kozlov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Sergey V. Kuznetsov**, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

**Roode Liias**, Tallin University of Technology, Estonia

**Nikolai P. Osmolovskii**, Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Republic of Poland

**Andrey B. Ponomarev**, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**Miroslav Premrov**, University of Maribor, Republic of Slovenia

**Svetlana V. Samchenko**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Vladimir N. Sidorov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Nikolay I. Vatin**, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

**Josef Vichan**, University of Zilina, Slovak Republic

**Joost Walraven**, Delft University of Technology, Netherlands

**Zbigniew Wojcicki**, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

## Editorial team of issues

**Executive editor:** *Anna A. Dyadicheva*    **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

**Editor:** *Tat'yana V. Berdnikova*    **Layout:** *Aleksandr D. Fedotov*

**Russian-English translation:** *Ol'ga V. Yudenkova*

## Chairman of the Editorial Board

*Alexander R. Tusnin*, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

## Editorial Council

**Yuri V. Alekseev**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Nikolay V. Banichuk**, A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation

**Igor A. Bondarenko**, Federal State Budgetary Institution “TsNIIP of the Ministry of Construction of Russian Federation”, Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Development (NIITIAG), Moscow, Russian Federation

**Nina V. Danilina**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Natalya N. Fedorova**, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

**Nataliya V. Fedorova**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Vladimir G. Gagarin**, Scientific-research Institute of building physics Russian Federation Academy of architecture and construction Sciences, Moscow, Russian Federation

**Boris. B. Khrustalev**, Penza state University of architecture and construction, Penza, Russian Federation

**Mikhail N. Kirsanov**, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI), Moscow, Russian Federation

**Oleg V. Kabantsev**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Elena Yu. Kulikova**, National Research Technological University “MISiS”, Moscow, Russian Federation

**Leonid S. Lyakhovich**, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

**Rashid A. Mangushev**, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

**Vladimir L. Mondrus**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Andrei A. Morozenko**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Nadezhda S. Nikitina**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Vladimir A. Orlov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Peter J. Pahl**, Berlin Technical University, Federal Republic of Germany

**Oleg G. Primin**, “MosVodoKanalNIIProekt” JSC, Moscow, Russian Federation

**Stanislav V. Sobol**, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Mikhail Yu. Slesarev**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Yury A. Tabunschikov**, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

**Vladimir I. Travush**, CJSC “Gorproject”, Moscow, Russian Federation

**Viktor V. Tur**, Brest State Technical University Brest, Republic of Belarus; Bialystok University of Technologies, Bialystok, Republic of Poland

**Natalia G. Verstina**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

**Natal'ya Yu. Yas'kova**, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

**Alexander N. Vlasov**, Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

# СОДЕРЖАНИЕ

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

*С.В. Корниенко, Е.А. Дикарева*

**Фактическая видимость небосвода при затенении деревьями с различной плотностью кроны . . . . . 1021**

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

*М.Н. Курсанов*

**Деформации пространственной модели трехгранной стержневой башни с двойной решеткой . . . . . 1032**

*А.И. Гиясов, Е.В. Карасёв*

**Термическая оценка вертикальных ограждающих конструкций с учетом тепловых воздействий . . . . . 1039**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*С.А. Агафонов, В.А. Волкодав, И.А. Волкодав, И.Д. Титова*

**Актуальные направления развития отечественной нормативно-технической документации в области строительства из древесины с учетом зарубежного опыта . . . . . 1055**

*Д.Р. Низин, Т.А. Низина, А.В. Марьянова, Е.Б. Миронов*

**Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика . . . . . 1078**

## БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

*К.Л. Чертес, А.А. Букин, Н.С. Бухман, В.Н. Пыстин, А.П. Сеяно, О.В. Тупицына*

**Прогнозирование и ликвидация загрязнений в экосистемах, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями . . . . . 1089**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*Е.М. Терихов, А.С. Анишаков*

**Анализ методов расчета устойчивости ячеистых конструкций . . . . . 1104**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*С.М. Эгнатосян, Н.М. Эгнатосян, Л.А. Ерицян*

**Уменьшение теплопоступления в зданиях за счет искусственного понижения температуры наружного воздуха путем испарительного охлаждения . . . . . 1114**

*М.А. Карташов, Е.И. Иванова, К.И. Стрелец, А.Е. Радаев*

**Эффективность применения солнечных панелей в условиях Ленинградской области . . . . . 1123**

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*А.А. Латидус, И.С. Шевченко*

**Основные принципы формирования организационно-технологической платформы научно-технического сопровождения уникальных объектов . . . . . 1138**

*Е.С. Зуева, Т.С. Мецзяркова*

**Реставрационные работы и капитальный ремонт на объектах культурного наследия: базовые аспекты оцифровки зданий при прогнозировании и планировании работ. . . . . 1148**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 1158**

1018

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Sergey V. Kornienko, Ekaterina A. Dikareva*

**Actual sky visibility under shading by trees with different crown densities . . . . . 1021**

## CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING. CONSTRUCTION MECHANICS. BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

*Mikhail N. Kirsanov*

**Deformations of a three-dimensional model of a trihedral double lattice rod tower . . . . . 1032**

*Adham I. Giyazov, Egor V. Karasev*

**Thermal assessment of vertical enclosing structures taking into account thermal effects . . . . . 1039**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Sergei A. Agafonov, Vladimir A. Volkodav, Ivan A. Volkodav, Irina D. Titova*

**Current directions of development of domestic regulatory and technical documentation in the field of timber construction considering foreign experience . . . . . 1055**

*Dmitrij R. Nizin, Tat'yana A. Nizina, Anna V. Mar'yanova, Evgenij B. Mironov*

**Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic samples . . . . . 1078**

## SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

*Konstantin L. Chertes, Aleksey A. Bukin,*

*Nikolai S. Bukhman, Vitaliy N. Pystin, Artem P. Seyanko, Olga V. Tupitsyna*

**Prediction and elimination of pollution in ecosystems formed by decommissioned sludge reservoirs . . . . . 1089**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Egor M. Terikhov, Aleksandr S. Anshakov*

**Analysis of methods for calculating the stability of cellular structures. . . . . 1104**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Siranush M. Egnatosyan, Naira M. Egnatosyan, Lusine H. Yeritsyan*

**Reducing heat gain in buildings by artificially lowering the outside air temperature through evaporative cooling . . 1114**

*Mikhail A. Kartashov, Ekaterina I. Ivanova, Kseniya I. Strelets, Anton E. Radaev*

**Efficiency of solar panels application in conditions of Leningrad region . . . . . 1123**

## TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

*Azariy A. Lapidus, Irina S. Shevchenko*

**Main principles of the formation of organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects . . . . . 1138**

*Elena S. Zueva, Tatiana S. Meshcheryakova*

**Restoration works and major repairs at cultural heritage sites: basic aspects of building digitization in forecasting and planning of works . . . . . 1148**

**Requirements for research paper design . . . . . 1158**

1019

## ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

В научно-техническом журнале «Вестник МГСУ» публикуются научные материалы по проблемам строительной науки и архитектуры (строительство в России и за рубежом: материалы, оборудование, технологии, методики; архитектура: теория, история, проектирование, реставрация; градостроительство).

Тематический охват соответствует научным специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура);
- 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки);
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки);
- 5.2.6. Менеджмент (экономические науки).

По указанным специальностям журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. К рассмотрению и публикации в основных тематических разделах журнала принимаются аналитические материалы, научные статьи, обзоры, рецензии и отзывы на научные публикации по фундаментальным и прикладным вопросам строительства и архитектуры.

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (одностороннее слепое) с участием редсовета и привлечением внешних экспертов — активно публикующихся авторитетных специалистов по соответствующим предметным областям.

Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

## AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

In the scientific and technical journal “Vestnik MGSU” Monthly Journal on Construction and Architecture are published the scientific materials on construction science and architectural problems (construction in Russia and abroad; materials, equipment, technologies, methods; architecture: theory, history, design, restoration; urban planning).

The subject matter coverage complies with the approved list of scientific specialties:

Analytical materials, scientific articles, surveys, reviews on scientific publications on fundamental and applied problems of construction and architecture are admitted to examination and publication in the main topic sections of the journal.

All the submitted materials undergo scientific reviewing (double blind) with participation of the editorial board and external experts — actively published competent authorities in the corresponding subject areas.

The review copies or substantiated refusals from publication are provided to the authors and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (upon request). The reviews are deposited in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the main provisions of the existing Russian Legislation concerning copyright, plagiarism and libel, and ethical principles approved by the international community of leading publishers of scientific periodicals and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER  
УДК 712.4:711  
DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1021-1031

## Фактическая видимость небосвода при затенении деревьями с различной плотностью кроны

Сергей Валерьевич Корниенко, Екатерина Александровна Дикарева

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Развитие зеленой инфраструктуры — важная задача при формировании градостроительных стратегий для снижения эффекта городского теплового острова (ГТО) и совершенствования городской экосистемы. Цель исследования — определение фактической видимости небосвода при затенении деревьями, имеющими различную плотность кроны. Научная новизна состоит в том, что впервые проведено исследование фактической видимости небосвода с учетом затенения деревьями как сложными гетерогенными системами для оценки эффекта смягчения ГТО. Практическая значимость заключается в установлении фактической видимости небосвода при затенении деревьями с различной плотностью кроны, что позволяет произвести коррекцию имитационных моделей для анализа параметров микроклимата городской среды в заданных климатических условиях.

**Материалы и методы.** Проведены прямые измерения путем фотографирования с помощью специального объектива «рыбий глаз» и смартфона. Исследования выполнены в условиях умеренно-континентального климата (согласно международной классификации климата Кёппен — тип Dfa). Выбраны несколько видов деревьев, наиболее часто встречающихся при озеленении в рассматриваемых климатических условиях и имеющих различную плотность кроны: вяз, дуб, клен и тополь. По каждому отобрано несколько образцов, необходимых для усреднения данных. Всего изучено 27 образцов.

**Результаты.** Построена диаграмма измеренных усредненных значений фактора видимости небосвода с учетом затенения деревьями, имеющими различную плотность кроны, в различные периоды года. Для защиты от прямой солнечной радиации летом в дневное время лучше применять деревья с плотной раскидистой кроной, для интенсификации лучистого теплообмена городской поверхности с небосводом ночью — деревья с меньшей плотностью кроны. В случае необходимости смягчения ГТО в течение суток наиболее эффективными являются гибридные решения.

**Выводы.** Фактическая оценка видимости небосвода, выполненная авторами с учетом затенения деревьями, позволяет произвести коррекцию имитационных моделей для анализа параметров микроклимата городской среды в заданных климатических условиях. Результаты исследования дают возможность выбрать тип дерева, обеспечивающий требуемое затенение и эффект смягчения ГТО.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городское планирование, охлаждение, пассивные стратегии, фактор видимости небосвода, городской тепловой остров, «рыбий глаз», климат, тепловой комфорт, деревья, зеленая инфраструктура

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Корниенко С.В., Дикарева Е.А. Фактическая видимость небосвода при затенении деревьями с различной плотностью кроны // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1021–1031. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1021-1031

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Александровна Дикарева, ea.dikareva@gmail.com.

## Actual sky visibility under shading by trees with different crown densities

Sergey V. Kornienko, Ekaterina A. Dikareva

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The development of green infrastructure is an important task in urban planning strategies to reduce urban heat island effect and improve urban ecosystem. The aim of this study is to determine the actual visibility of the skyline when shaded by trees of different crown densities. The scientific novelty is that for the first time a study of the actual sky visibility with trees shading as complex heterogeneous systems has been conducted to assess the effect of mitigating of urban heat island. The practical significance lies in the establishment of the actual visibility of the firmament under the shading of trees with different crown density, which enables the correction of simulation models to analyze the parameters of the microclimate of the urban environment under given climatic conditions.

**Materials and methods.** Various approaches to determining the sky visibility are considered. Direct measurements were made by photographing with a special fisheye lens and a smartphone. The research was carried out in a temperate continental climate (according to the international climate classification Köppen — type Dfa). Several tree species most commonly found in landscaping under the climate conditions in question and having different crown densities were selected: elm, oak, maple and poplar. For each, several samples were selected as required for data averaging. A total of 27 samples were studied.

**Results.** A diagram of measured averaged values of the sky visibility factor was plotted, taking into account shading by trees with different crown densities in different periods of the year. To protect trees with dense spreading crowns from the direct solar radiation in the summer daytime, it is better to use trees with dense spreading crowns to intensify the radiant heat exchange of the urban surface with the sky at night — trees with less dense crowns. In case of the need to soften the urban heat island during the day, hybrid solutions are the most effective.

**Conclusions.** The actual assessment of the sky visibility, made by the authors taking into account shading by trees, allows us to make corrections in simulation models to analyze the parameters of the microclimate of the urban environment under the given climatic conditions. The results of the study make it possible to select the type of tree providing the required shading and urban heat island’s mitigation effect.

**KEYWORDS:** urban planning, cooling, passive strategies, sky view factor (SVF), urban heat island, fish-eye, climate, thermal comfort, trees, green infrastructure

**FOR CITATION:** Kornienko S.V., Dikareva E.A. Actual sky visibility under shading by trees with different crown densities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1021-1031. DOI: 10.22227/1997-0935. 2023.7.1021-1031 (rus.).

Corresponding author: Ekaterina A. Dikareva, ea.dikareva@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

На основании данных, представленных в статье [1], определено, что разность между температурами в городской и пригородной местности может иметь значение в 5 °С и выше. В связи с этим образуется городской остров тепла — область, имеющая повышенные температуры воздуха и поверхностей в сравнении с периферией. Феномен городского теплового острова (ГТО) был определен в начале XIX в. в работах Л. Говарда. Актуальность этот феномен получил в последние десятилетия в связи с ускорением темпа урбанизации, изменяющей климат в мегаполисах [2–7]. Изменение теплового, воздушного и влажностного режимов городской среды влияет на качество воздуха и потребление энергии [8–10]. Городской остров тепла — это серьезная проблема для жизнеспособности городских экосистем, здоровья горожан и их жизнедеятельности [11].

Различают антропогенные и климатогеографические факторы, влияющие на возникновение эффекта ГТО (рис. 1). Антропогенные факторы, связанные с деятельностью человека, включают морфологические особенности застройки, возможность образова-

ния «городских пустынь» и «городских каньонов», тепловое загрязнение окружающей среды, городские туманы и др. [12]. Они изменяют природные комплексы и процессы, сложившиеся в ходе эволюции биосферы. Антропогенные показатели могут существенно повлиять на изменение климатогеографических факторов: скорость и интенсивность ветрового потока, температурно-влажностный режим территории застройки, облачность и стабильность воздушных масс. Антропогенные и климатогеографические факторы взаимно влияют друг на друга, что должно учитываться при оценке ГТО.

Недостаточная площадь озеленения мегаполисов усиливает проблему образования ГТО. Из-за сокращения растительности, в особенности деревьев, в городской среде уменьшается количество затененных пространств, снижается охлаждающий испарительный эффект от деревьев и грунтовых поверхностей. К примеру, в полдень в период с повышенными температурами воздуха разность между поверхностными температурами озелененной поверхности и черной кровли может составлять 25–30 °С [13, 14]. Поверхности фасадов, дорожные покрытия и тротуары, находящиеся под прямыми

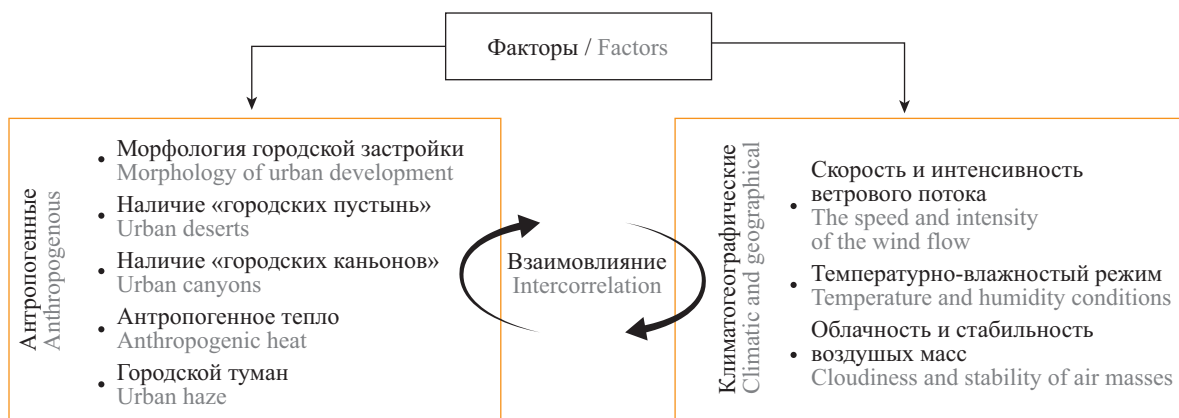


Рис. 1. Факторы, влияющие на возникновение эффекта городского теплового острова

Fig. 1. Factors influencing the occurrence of the urban heat island effect

лучами солнца и нагревающиеся до высоких температур, излучают тепловые волны, которые негативно влияют на здоровье жителей города (рис. 2) [15, 16]. В связи с этим важной задачей по снижению эффекта ГТО и улучшению микроклиматических показателей городской среды является развитие зеленой инфраструктуры города.

Фактор видимости небосвода в точке подстилающей поверхности при затенении деревьями имеет большое значение при изучении ГТО. Дерево — сложная гетерогенная система. Взрослое дерево состоит из трех частей: корней, ствола и кроны. Крона имеет наибольшее регулирующее воздействие на микроклимат урбанизированных территорий. Крона — статистический ансамбль листвы, ветвей разного порядка, цветов и плодов. Через многочисленные просветы в кроне любого дерева проходят радиационные потоки. Плотность кроны определяется количеством просветов между листвой. Плотная крона дерева днем позволяет сдерживать потоки прямой коротковолновой солнечной радиации, что обеспечивает наиболее высокий затеняющий эффект. Ночью подобная крона может блокировать потоки длинноволновой радиации в сторону более холодного ночного неба, что будет усиливать эффект образования ГТО.

Фактор видимости небосвода (Sky View Factor — SVF) — количественная мера видимости небосвода. Это геометрический показатель, который определяет долю небесной полусферы, наблюдаемой из определенной точки местности. Значения SVF меняются от 0 до 1 (или от 0 до 100 %). При SVF = 0 небосвод полностью закрыт, при SVF = 1 — полностью открыт. SVF существенно влияет на среднюю радиационную температуру (Mean Radiant Temperature — MRT), широко при-

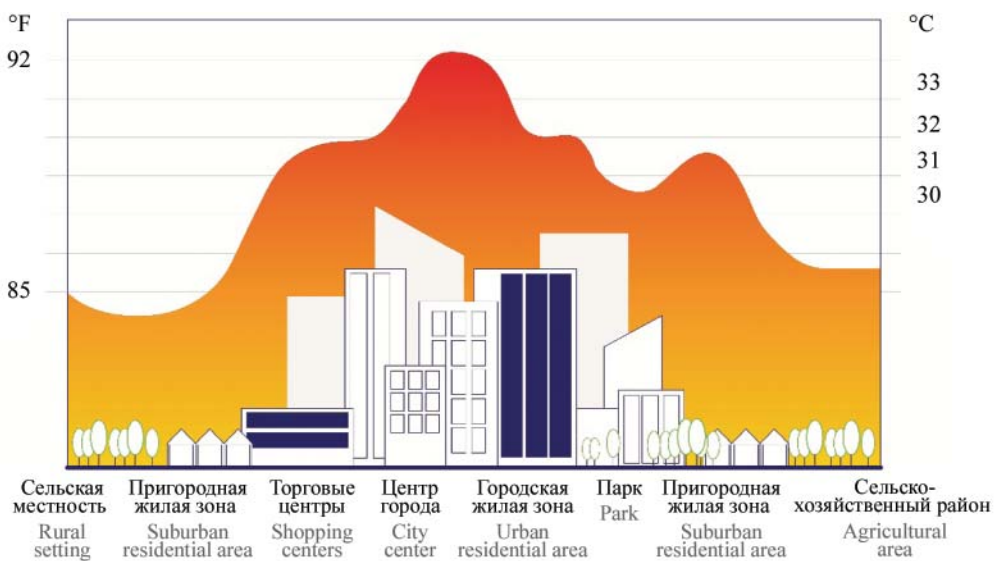
меняемую для оценки теплового комфорта среды [17–19]. Кроны деревьев дают возможность значительно снизить SVF и являются источником тени, поэтому показатель SVF следует учитывать при анализе и оценке теплового комфорта городских территорий.

SVF может быть определен экспериментально с помощью фотосъемки так называемыми дисторсирующими (сверхширокоугольными) объективами типа «рыбий глаз» (fish-eye). От обычных короткофокусных объективов дисторсирующий объектив отличается ярко выраженной бочкообразной аберрацией, позволяющей отображать пространство и предметы при помощи азимутальной, ортографической или стереографической проекции объектива. В работе [18] показано, что полусферическая линза «рыбий глаз» была разработана Р. Хиллом в 1924 г. для наблюдения за процессами образования облаков. Позднее П. Ричем и Р. Пирси выполнены более подробные исследования SVF. На основе полусферической фотографии устанавливается общая видимость небосвода при затенении деревом, однако расположение камеры за пределами горизонтальной проекции кроны затрудняет оценку SVF с учетом просветов в кроне.

Цель исследования заключается в определении фактической видимости небосвода (SVF) при затенении деревьями с различной плотностью кроны для оценки эффекта смягчения ГТО.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные вычислительные методы по определению видимости небосвода рассмотрены в статье [20]. Вследствие того, что ключевые методы



**Рис. 2.** Схема формирования городского теплового острова  
**Fig. 2.** Scheme of the formation of an urban heat island

исследования фактора видимости небосвода представлены для объектов с относительно простой конфигурацией, для сложных гетерогенных систем, таких как деревья, было решено применять прямые измерения посредством фотографирования с помощью специального объектива «рыбий глаз» и смартфона. Исследования выполнены в условиях умеренно-континентального климата в г. Волгограде (согласно международной классификации климата Кӧрпен — тип Dfa). Выбраны несколько видов деревьев, наиболее часто встречающиеся при озеленении в рассматриваемых климатических условиях и имеющие различную плотность кроны: вяз, дуб, клен и тополь. По каждому из этих видов деревьев отобраны несколько образцов, необходимых для усреднения данных. Всего исследовано 27 образцов.

Плотность кроны меняется в течение года, поэтому натурные исследования SVF проводились в различные месяцы года:

1. Временная точка SP-1 (10.05.2021, время проведения с 12:00 до 13:00). В это время небосвод был полностью закрыт облаками (облачность 10 баллов), что исключало попадание прямых солнечных лучей в объектив.

2. Временная точка SP-2 (16.07.2021, время проведения с 18:30 до 19:00). Время проведения определялось в связи с отсутствием днем облачности на небосводе и с ее повышением до 7 баллов к вечеру, что позволило получить достаточно качественные фотоизображения.

3. Временная точка SP-3 (03.10.2021, время проведения с 16:30 до 17:00). Облачность — 7 баллов, также были получены фото, пригодные для дальнейшей обработки.

Во всех случаях камера располагалась под деревом, около его ствола (рис. 3).

Подобная методика дает возможность получить информацию по фактору видимости небосвода при затенении деревьями с учетом просветов в кроне.

Для обработки фотоизображений применен метод черных, белых и серых пикселей. Количество белых пикселей определяет долю видимого участка небосвода из данной точки через крону дерева, количество черных пикселей — долю затенения листвой и ветвями различного порядка (рис. 4). При обработке фотоизображений фон (угловые участки на рис. 4, а) был исключен.



Рис. 3. Схема фотосъемки (а) и итоговое фотоизображение (b)

Fig. 3. Shooting scheme (a) and final photo image (b)

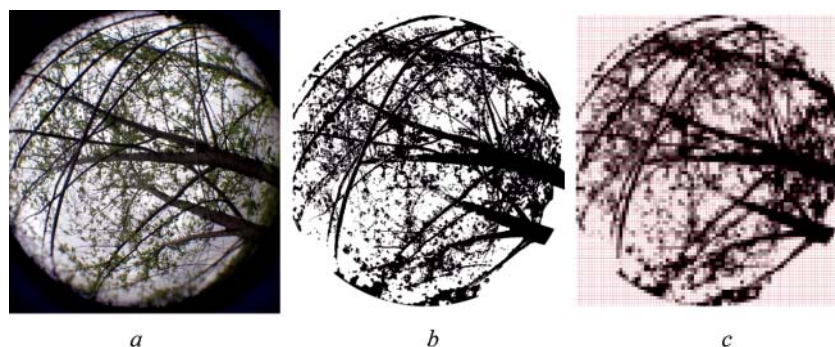


Рис. 4. Схема определения SVF при затенении деревом: а — фотоизображение, полученное с помощью полусферической линзы; б — черно-белая подложка; с — сеточная (пиксельная) модель

Fig. 4. Scheme for determining SVF when shading with a tree: a — photographic image obtained with a hemispherical lens; b — black and white background; c — grid (pixel) model

Для предварительной оценки черно-белых изображений применялся программный комплекс (ПК) Photoshop. Однако при замене цветного изображения на черно-белое возможно образование так называемых краевых пикселей с меньшей плотностью, которые позволяют дополнительно выявить оттенки серого. Последующая оценка фотографических данных происходила в специализированном программно-вычислительном комплексе Pixel Color Counter. Главная особенность этого комплекса — возможность разделения изображения на пиксели заданного уровня интенсивности (рис. 4), что в ряде случаев повышает точность результатов. В связи с наличием в каждом из вариантов обработки определенной доли погрешности результаты были усреднены.

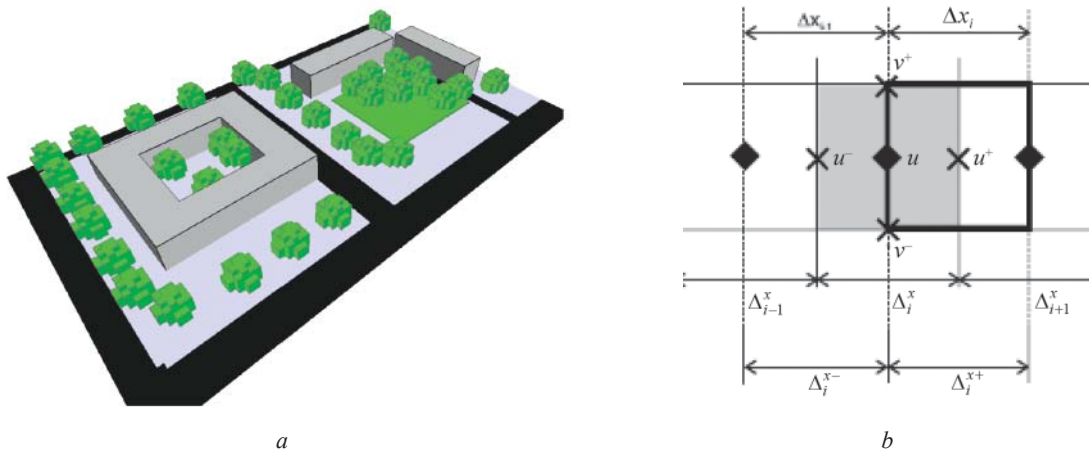
Проверка данных подтверждает возможность использования этого оборудования для полевых исследований [20].

Результаты определения SVF с учетом затенения деревьями могут быть использованы для построения имитационной модели в ENVI-met с целью оценки теплового режима городских территорий.

ENVI-met представляет собой трехмерную модель, предназначенную для имитации взаимодействия поверхности, растений и воздуха в городской среде, основанную на фундаментальных законах термо- и гидродинамики. При расчете модели можно в том числе проанализировать потоки коротковолнового и длинноволнового излучения с учетом затенения, отражения и переизлучения от комплекса зданий и растительности. Основными переменными, используемыми в ПК ENVI-met, являются температура воздуха, влажность, скорость и направление ветра, степень турбулентности воздушных потоков и диспергированности среды, радиационные (лучистые) потоки, биоклиматологические характеристики и др. [21].

Одним из ключевых преимуществ интеграции зеленых насаждений в городскую среду служит способность растительности снижать температуру воздуха за счет затенения, теплопередачи и эвапотранспирации. ENVI-met позволяет проводить детальное моделирование теплового режима для анализа температурного воздействия растительности на окружающую территорию, а также влияния местных климатических условий на растительность (рис. 5, а). ENVI-met использует С-сетку Аракавы для представления и вычисления ортогональных физических величин в узлах ячеек сеточной модели (рис. 5, б). Применяя специальную маркировку ячеек, можно моделировать различные «элементы» городской среды: дороги с твердым и грунтовым покрытием, здания, растительные формы и др.

Существует ряд исследований по оценке моделей деревьев с помощью ENVI-met в различных климатических зонах. Исследователи из Германии [23] при сравнении интенсивности транспирации деревьев с данными, полученными в результате использования ПК ENVI-met, пришли к выводу, что программный комплекс недостаточно точно оценивает ночную транспирацию деревьев. Авторы из Германии [24] при сравнении информации пришли к выводу, что на результаты также влияет фотосинтетически активная радиация. Расчет по программе ENVI-met давал более точные результаты в ясные дни с высокой фотосинтетически активной радиацией, чем при других погодных условиях. Исследователи из США [25] для построения моделей в ENVI-met с использованием тропических деревьев измерили фактический индекс площади листовой поверхности (LAI), продемонстрировав, что точность получаемых данных в ENVI-met увеличивается. Указанные работы свидетельствуют о необходимости проведения исследований по определению фактических показателей деревьев, расположенных в разных климатических зонах, для корректировки



**Рис. 5.** Пример модели, создаваемой в ENVI-met (а), и схема сеточного шаблона на основе С-сетки Аракавы (б) [22]  
**Fig. 5.** An example of a model created in ENVI-met (a) and scheme of grid template based on Arakawa C-grid (b) [22]

данных в программно-вычислительных комплексах, таких как ENVI-met. Использование фактических показателей деревьев позволяет более точно оценить влияние различных сценариев озеленения кварталов на эффект смягчения ГТО.

Подобные расчеты с применением имитационных моделей дают возможность решить ряд важных задач, например установить теплоустойчивость покрытий при воздействии периодических тепловых волн; оценить комфортность и безопасность городской среды, влияние ГТО на энергопотребление зданий.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам исследования построена диаграмма измеренных усредненных значений фактора видимости небосвода для рассматриваемых видов деревьев в различные периоды года (рис. 6).

На основе анализа полученных данных можно сделать вывод, что минимальные значения SVF для всех видов деревьев выявлены в июле, когда крона деревьев наиболее плотная и непроницаемая. Фактор видимости небосвода в мае и октябре имеет более высокие значения, чем в июле. Подобные результаты объясняются тем, что в мае у деревьев листва раскрыта не в полном объеме, а в октябре наблюдается листопад. Дуб (SVF = 22,9 %) обеспечивает максимальный эффект затенения в летний пе-

риод, вяз (SVF = 30,4 %) — минимальный эффект. Определено, что деревья с более плотной кроной препятствуют потокам длинноволновой радиации, что обуславливает рост ГТО.

Для приближенной оценки влияния деревьев на ГТО используем сведения работы [26] в виде уравнения линейной регрессии, устанавливающего связь между SVF и разностью температур  $\Delta T$  на застроенной и открытой поверхностях:

$$\Delta T = -10,5(SVF) + 11,2. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что чем меньше значение SVF, тем больше  $\Delta T$ , следовательно, риск образования ГТО выше на застроенной территории, чем на открытой. Деревья с более плотной кроной (меньшее значение SVF) блокируют длинноволновые радиационные потоки в ночное время суток, что приводит к повышению  $\Delta T$ , а следовательно, к росту теплового острова. Сравнивая полученные результаты, можно отметить, что минимальное значение ( $\Delta T = 8,0$  К) дает вяз, максимальное ( $\Delta T = 8,8$  К) — дуб. Поэтому для защиты от прямой солнечной радиации в дневное время лучше всего применять деревья с плотной раскидистой кроной, а для интенсификации лучистого теплообмена городской поверхности с небосводом ночью — деревья с меньшей плотностью кроны. Если требуется смягчение ГТО в течение суток наиболее эффективными будут гибридные решения.

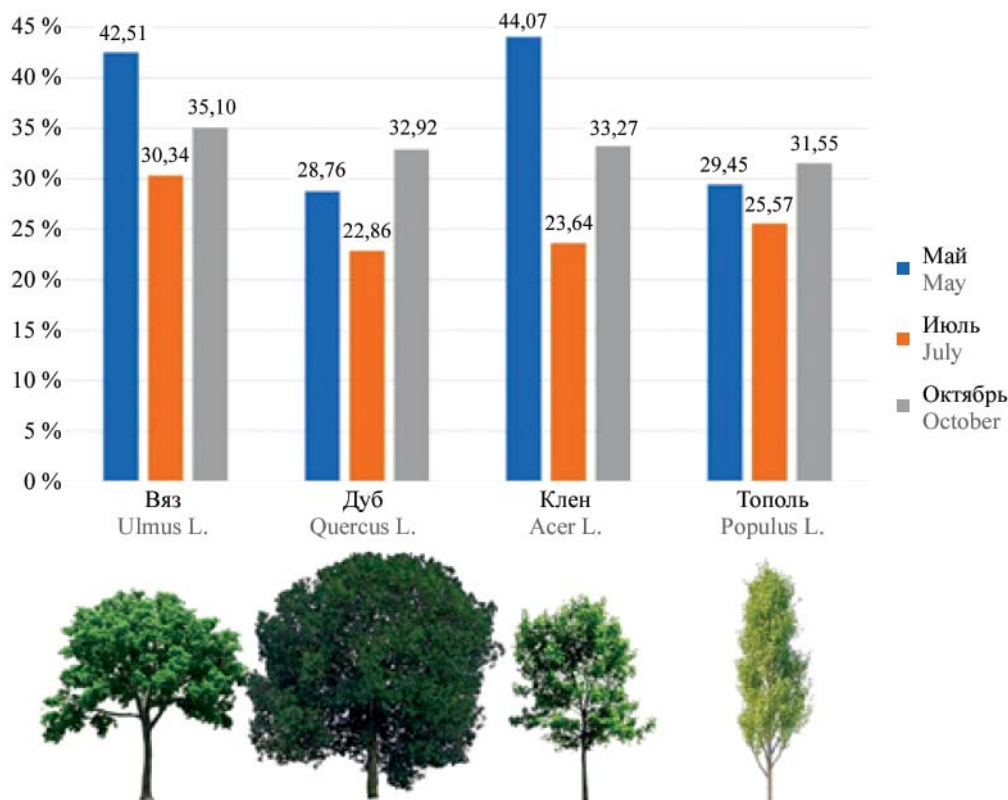


Рис. 6. Значения SVF по каждому виду дерева в зависимости от времени года  
 Fig. 6. SVF values for each type of tree depending on the season

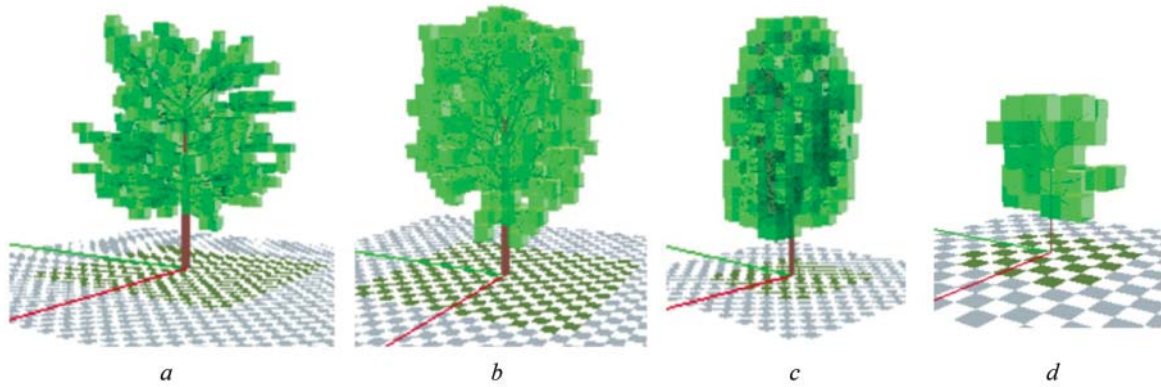


Рис. 7. Способ моделирования деревьев в программно-вычислительном комплексе ENVI-met: *a* — вяз; *b* — дуб; *c* — тополь; *d* — клен

Fig. 7. A method for simulating trees in the ENVI-met software package: *a* — elm; *b* — oak; *c* — populus; *d* — acer

Полученные в настоящем исследовании фактические значения SVF с учетом затенения деревьями могут быть использованы при уточнении имитационных моделей микроклимата.

Как показано в публикации [27], наиболее эффективен анализ ГТО средствами имитационного моделирования микроклимата в программно-вычислительном комплексе ENVI-met. В ENVI-met модель дерева представляет собой сложное геометрическое тело, состоящее из множества объемных элементов, формирующих необходимый тип кроны (рис. 7). Для построения более точной компьютерной модели следует задавать фактические геометрические характеристики деревьев для конкретной климатической зоны, так как они существенно влияют на результаты расчета теплового режима участков, облучаемых Солнцем и находящихся в тени.

Каждый объемный элемент дерева характеризуется плотностью листовой поверхности кроны (Leaf Area Density — LAD) и плотностью корневой поверхности (Root Area Density — RAD). Эти характеристики применяются в ENVI-met для описания всех типов растительности: от газонного покрытия до высоких деревьев (рис. 8) [27, 28].

Фактическая оценка видимости небосвода, выполненная авторами с учетом затенения деревьями, позволяет произвести коррекцию моделей деревьев в ENVI-met в заданных климатических условиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие зеленой инфраструктуры в городской среде — важная задача при формировании градостроительных стратегий для снижения эффекта ГТО и совершенствования городской экосистемы. Цель данного исследования заключается в определении фактической видимости небосвода при затенении деревьями, имеющими различную плотность кроны, для оценки эффекта смягчения ГТО.

Рассмотрены различные подходы к установлению видимости небосвода. Для определения фактической видимости небосвода при затенении деревьями проведены прямые измерения путем фотографирования с использованием специального объектива «рыбий глаз» и смартфона. Оценка полученных данных показывает возможность применения этого оборудования для оперативных полевых исследований. Исследования выполнены в условиях умеренно-континентального климата (согласно международной классификации климата Кёппен — тип Dfa). Выбраны несколько видов деревьев, наиболее часто встречающихся при озеленении в рассматриваемых климатических условиях и имеющих различную плотность кроны: вяз, дуб, клен и тополь. По каждому из этих видов деревьев отобрано несколько образцов, необходимых для усреднения данных. Всего изучено 27 образцов.

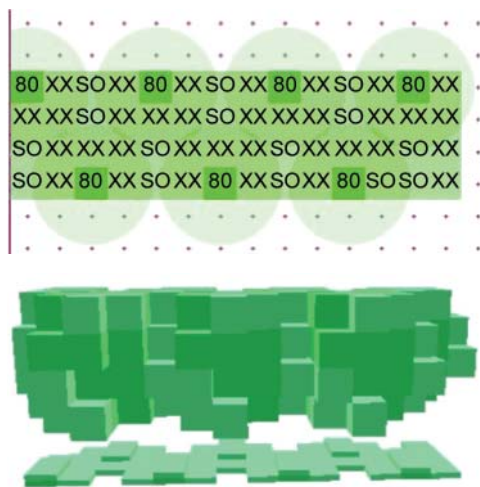


Рис. 8. Пример расположения группы растений (деревья, кустарники, трава)

Fig. 8. An example of the arrangement of a group of plants (trees, shrubs, herb)

По итогам исследования построена диаграмма измеренных усредненных значений фактора видимости небосвода с учетом затенения деревьями, имеющими различную плотность кроны, в различные периоды года. Показано, что для защиты от прямой солнечной радиации летом в дневное время лучше всего применять деревья с плотной раскидистой кроной, а для интенсификации лучистого теплообмена городской поверхности с небосводом ночью — деревья с меньшей плотностью кроны. В случае необходимости смягчения ГТО

в течение суток наиболее эффективными являются гибридные решения.

Фактическая оценка видимости небосвода, выполненная авторами с учетом затенения деревьями, позволяет произвести коррекцию имитационных моделей для анализа параметров микроклимата городской среды в заданных климатических условиях. Результаты исследования дают возможность выбрать тип дерева, обеспечивающий необходимое затенение и эффект смягчения городского острова тепла.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1982. Vol. 108. Issue 455. Pp. 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502
2. Schade J., Lidelöw S., Lönnqvist J. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate // Energy and Buildings. 2021. Vol. 241. P. 110961. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110961
3. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P. Climate change and the thermal island effect in the million-plus city // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. No. 4 (89). P. 8902. DOI: 10.18720/CUBS.89.2. EDN HKXRTS.
4. Hamburg A., Kalamees T. How well are energy performance objectives being achieved in renovated apartment buildings in Estonia? // Energy and Buildings. 2019. Vol. 199. Pp. 332–341. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.006
5. Korniyenko S.V., Dikareva E.A. Generation, development and mitigation of the urban heat island: a review // AlfaBuild. 2021. Vol. 16. Issue 1 P. 1605. DOI: 10.34910/ALF.16.5. EDN GCUWIM.
6. Korniyenko S.V. The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 6 (114). DOI: 10.34910/MCE.114.12
7. Vatin N., Korniyenko S.V. Energy performance of buildings made of textile-reinforced concrete (TRC) sandwich panels // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 5 (113). DOI: 10.34910/MCE.113.3
8. Korniyenko S.V. Renovation of residential buildings of the first mass series // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022060. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022060
9. Hsieh C.M., Li J.J., Zhang L., Schwegler B. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use // Energy and Buildings. 2018. Vol. 159. Pp. 382–397. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.045
10. Alev Ü., Eskola L., Arumägi E., Jokisalo J., Donarelli A., Siren K. et al. Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region // Energy and Buildings. 2014. Vol. 77. Pp. 58–66. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.049
11. Zemitis J., Borodinecs A., Frolova M. Measurements of moisture production caused by various sources // Energy and Buildings. 2016. Vol. 127. Pp. 884–891. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.045
12. Li D.H.W., Cheung G.H.W., Lau C.C.S. A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept // Building and Environment. 2006. Vol. 41. Issue 5. Pp. 578–589. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.02.027
13. Chandler T.J. The climate of towns // The Climate of the British Isles. London : Longman, 1976. Ch. 14. Pp. 307–329.
14. Krebs L.F., Johansson E. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil — A study coupling outdoor and indoor thermal simulations // Energy and Buildings. 2021. Vol. 241. P. 110963. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110963
15. Hoelscher M.T., Nehls T., Jänicke B., Wessolek G. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation // Energy and Buildings. 2016. Vol. 114. Pp. 283–290. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047
16. Chung W.J., Lim J.H. Cooling operation guidelines of thermally activated building system considering the condensation risk in hot and humid climate // Energy and Buildings. 2019. Vol. 193. Pp. 226–239. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.049
17. Buchin O., Hoelscher M.T., Meier F., Nehls T., Ziegler F. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands // Energy and Buildings. 2016. Vol. 114. Pp. 27–37. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.038
18. Svensson M.K. Sky view factor analysis — implications for urban air temperature differences // Meteorological Applications. 2004. Vol. 11. Issue 3. Pp. 201–211. DOI: 10.1017/S1350482704001288
19. Gál T., Lindberg F., Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and

vector databases: Comparison and application to urban climate // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. Vol. 95. Issue 1–2. Pp. 111–123. DOI: 10.1007/s00704-007-0362-9

20. Korniyenko S.V., Dikareva E.A. The sky visibility at shading by trees // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. No. 4 (102). P. 10203. DOI: 10.4123/CUBS.102.3

21. Afshar N.K., Karimian Z., Doostan R., Nokhandan M.H. Influence of planting designs on winter thermal comfort in an urban park // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2018. Vol. 26. Issue 3. Pp. 232–240. DOI: 10.3846/jeelm.2018.5374

22. Huttner S., Bruse M. Numerical modeling of the urban climate — a preview on ENVI-met 4.0 // *The seventh International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan, 2009.

23. Linden J., Simon H., Fonti P., Esper J., Bruse M. Observed and Modeled transpiration cooling from urban trees in Mainz, Germany // *ICUC9 — 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. 2015.

24. Simon H. Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and

improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-Met : Ph.D. Thesis. Johannes Gutenberg-University Mainz, Mainz, Germany, 2016.

25. Shinzato P., Yoshida D., Duarte D. Parametrization of tropical plants using ENVI-met V.4 and its impact on urban microclimates — Sao Paulo case study // *4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*. 2016.

26. Guo C., Buccolieri R., Gao Z. Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 203. P. 109433. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109433

27. Ле Минь Туан. Модели обеспечения экологической безопасности застройки (на примере г. Ханой — Вьетнам) : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 260 с.

28. Ле Минь Туан, Гельманова М.О., Шукуров И.С., Слесарев М.Ю., Нгуен Ван Минь. Исследование влияния озеленения Ханоя на эффект городского острова тепла // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2021. № 1 (33). С. 35–50. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-35-50. EDN TNILZC.

Поступила в редакцию 23 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Валерьевич Корниенко** — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой архитектуры зданий и сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 351367, Scopus: 56352359500, ResearcherID: G-1611-2018, ORCID: 0000-0002-5156-7352; skorn73@mail.ru;

**Екатерина Александровна Дикарева** — старший преподаватель, аспирант кафедры архитектуры зданий и сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 1065274, ORCID: 0000-0003-4888-7117; ea.dikareva@gmail.com.

Вклад авторов:

Корниенко С.В. — идея, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Дикарева Е.А. — сбор и обработка материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982; 108(455):1-24. DOI: 10.1002/qj.49710845502

2. Schade J., Lidelöw S., Lönnqvist J. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate. *Energy and Buildings*. 2021; 241:110961. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110961

3. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P. Climate change and the thermal island effect in the million-

plus city. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 4(89):8902. DOI: 10.18720/CUBS.89.2. EDN HKXRTS

4. Hamburg A., Kalamees T. How well are energy performance objectives being achieved in renovated apartment buildings in Estonia? *Energy and Buildings*. 2019; 199:332-341. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.006

5. Korniyenko S.V., Dikareva E.A. Generation, Development and Mitigation of the Urban Heat Island :

a Review. *AlfaBuild*. 2021; 1(16):1605. DOI: 10.34910/ALF.16.5. EDN GCUWIM.

6. Korniyenko S.V. The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 6(114). DOI: 10.34910/MCE.114.12

7. Vatin N., Korniyenko S.V. Energy performance of buildings made of textile-reinforced concrete (TRC) sandwich panels. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113). DOI: 10.34910/MCE.113.3

8. Korniyenko S.V. Renovation of residential buildings of the first mass series. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022060. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022060

9. Hsieh C.M., Li J.J., Zhang L., Schwegler B. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*. 2018; 159:382-397. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.045

10. Alev Ü., Eskola L., Arumägi E., Jokisalo J., Donarelli A., Siren K. et al. Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region. *Energy and Buildings*. 2014; 77:58-66. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.049

11. Zemitis J., Borodinecs A., Frolova M. Measurements of moisture production caused by various sources. *Energy and Buildings*. 2016; 127:884-891. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.045

12. Li D.H.W., Cheung G.H.W., Lau C.C.S. A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept. *Building and Environment*. 2006; 41(5):578-589. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.02.027

13. Chandler T.J. The climate of towns. *The Climate of the British Isles*. London, Longman, 1976; 14:307-329.

14. Krebs L.F., Johansson E. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil — A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. *Energy and Buildings*. 2021; 241:110963. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110963

15. Hoelscher M.T., Nehls T., Jänicke B., Wessolek G. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*. 2016; 114:283-290. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047

16. Chung W.J., Lim J.H. Cooling operation guidelines of thermally activated building system considering the condensation risk in hot and humid climate. *Energy and Buildings*. 2019; 193:226-239. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.049

17. Buchin O., Hoelscher M.T., Meier F., Nehls T., Ziegler F. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*. 2016; 114:27-37. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.038

18. Svensson M.K. Sky view factor analysis — implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*. 2004; 11(3):201-211. DOI: 10.1017/S1350482704001288

19. Gál T., Lindberg F., Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: Comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*. 2009; 95(1-2):111-123. DOI: 10.1007/s00704-007-0362-9

20. Korniyenko S.V., Dikareva E.A. The sky visibility at shading by trees. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 4(102):10203. DOI: 10.4123/CUBS.102.3

21. Afshar N.K., Karimian Z., Doostan R., Nokhandan M.H. Influence of planting designs on winter thermal comfort in an urban park. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2018; 26(3):232-240. DOI: 10.3846/jeelm.2018.5374

22. Huttner S., Bruse M. Numerical modeling of the urban climate — a preview on ENVI-met 4.0. *The seventh International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan, 2009.

23. Linden J., Simon H., Fonti P., Esper J., Bruse M. Observed and Modeled transpiration cooling from urban trees in Mainz, Germany. *ICUC9 — 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. 2015.

24. Simon H. *Modeling Urban Microclimate: Development, Implementation and Evaluation of New and Improved Calculation Methods for the Urban Microclimate Model ENVI-Met* : Ph.D. Thesis. Johannes Gutenberg-University Mainz, Mainz, Germany, 2016.

25. Shinzato P., Yoshida D., Duarte D. Parametrization of tropical plants using ENVI-met V.4 and its impact on urban microclimates — Sao Paulo case study. *4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*. 2016.

26. Guo C., Buccolieri R., Gao Z. Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment. *Energy and Buildings*. 2019; 203:109433. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109433

27. Le Minh Tuan. *Models for ensuring the environmental safety of development (on the example of Hanoi — Vietnam) : dis. ... candidate. tech. sciences*. Moscow, 2021; 260. (rus.).

28. Le Minh Tuan, Gelmanova M.O., Shukurov I.S., Slesarev M.Y., Nguyen Van Minh. Evaluating the effectiveness of vegetation scenarios to mitigate urban heat island in Hanoi city. *Biospheric compatibility: human, region, technologies*. 2021; 1(33):35-50. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-35-50. EDN TNILZC. (rus.).

*Received January 23, 2023.*

*Adopted in revised form on April 27, 2023.*

*Approved for publication on June 6, 2023.*

**BI O N O T E S:** **Sergey V. Kornienko** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Chief of the Department of Architecture of Buildings and Structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin av., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 351367, Scopus: 56352359500, ResearcherID: G-1611-2018, ORCID: 0000-0002-5156-7352; skorn73@mail.ru;

**Ekaterina A. Dikareva** — Senior Lecturer, postgraduate student of the Department of Architecture of Buildings and Structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin av., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 1065274, ORCID: 0000-0003-4888-7117; ea.dikareva@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Sergey V. Kornienko — conceptualization, scientific editing of the text, final conclusions.*

*Ekaterina A. Dikareva — data gathering and processing, writing of the article.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038

## Деформации пространственной модели трехгранной стержневой башни с двойной решеткой

Михаил Николаевич Кирсанов

*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»  
(НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расчет деформаций пространственных конструкций, как правило, выполняется численно на основе метода конечных элементов. С развитием систем компьютерной математики для регулярных систем появилась возможность получения аналитических решений. Такие решения можно использовать как тестовые для оценки численных решений, так и для предварительного расчета конструкции на этапе проектирования. Ставится задача вывести зависимости деформаций пространственной фермы под действием различных нагрузок от ее размеров и числа панелей.

**Материалы и методы.** Ферма конструкции башни статически определимая. Расчет величин усилий в стержнях выполняется методом вырезания узлов в системе символьной математики Maple. Для определения смещения узла вершины фермы используется формула Максвелла – Мора с учетом только продольных деформаций стержней. Из обобщения серии аналитических решений для ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей на произвольное число панелей методом индукции выводится искомая формула.

**Результаты.** Приведен алгоритм вывода формул для прогибов сооружения по двум взаимно перпендикулярным горизонтальным осям при действии боковых равномерно распределенных узловых нагрузок. Получены картины распределения усилий по стержням фермы и найдены аналитические зависимости усилий в некоторых стержнях от числа панелей. Обнаружены и вычислены линейные асимптотики решений по числу панелей и точки экстремума.

**Выводы.** Рассмотренная модель пространственной статически определимой фермы башни позволяет вывести точные в пределах принятой модели формулы для деформаций под действием различных нагрузок. Выведенные формулы можно использовать для предварительной оценки проектируемой конструкции и применять как тестовые для численных расчетов. Точки экстремума и аналитические выражения для асимптот позволяют применять выведенные формулы для решения задач оптимизации конструкции по жесткости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стержневая башня, ветровая нагрузка, аналитическое решение, прогиб, Maple, формула Максвелла – Мора, асимптота

*Благодарности.* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ 22-21-00473.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н. Деформации пространственной модели трехгранной стержневой башни с двойной решеткой // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1032–1038. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038

*Автор, ответственный за переписку:* Михаил Николаевич Кирсанов, C216@ya.ru.

## Deformations of a three-dimensional model of a trihedral double lattice rod tower

Mikhail N. Kirsanov

*National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The calculation of deformations of spatial structures, as a rule, is carried out numerically on the basis of the finite element method. With the development of computer mathematical systems for regular systems an opportunity to obtain analytical solutions appeared. Such solutions can be used as test ones to evaluate numerical solutions and for preliminary calculation of a structure at design stage. The task has been set to derive deformation dependences of a spatial truss under various loads from its size and number of panels.

**Materials and methods.** The truss of the tower structure is statically determined. The calculation of force values in the bars is performed by cutting out nodes in a Maple symbolic mathematics system. The Maxwell – Mohr formula is used to determine the displacement of a node at the top of the frame, considering only the longitudinal deformations of the rods. From the generalization of a series of analytical solutions for trusses with consecutively increasing number of panels onto an arbitrary number of panels the sought formula is derived by the induction method.

**Results.** An algorithm of derivation of formulas for the deflections of a building along two mutually perpendicular horizontal axes under the action of lateral uniformly distributed nodal loads is presented. Effort distribution patterns are obtained for the truss rods and analytical stress dependences of some rods on the number of panels are found. Linear asymptotics of the solutions for the number of panels and the points of extremum are found and computed.

**Conclusions.** The considered model of the spatial statically determined tower truss allows deriving exact formulas for deformations under the action of various loads within the limits of the adopted model. It is possible to use derived formulas for a preliminary estimation of designed structure and to apply as test ones for numerical calculations. The extremum points and analytical expressions for asymptotes allow the derived formulas to be used for solving stiffness optimization problems of a structure.

**KEYWORDS:** core tower, wind load, analytical solution, deflection, Maple, Maxwell – Mohr formula, asymptote

**Acknowledgements.** This work was financially supported by the Russian Science Foundation 22-21-00473.

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N. Deformations of a three-dimensional model of a trihedral double lattice rod tower. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1032-1038. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038 (rus.).

*Corresponding author:* Mikhail N. Kirsanov, C216@ya.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Расчет стержневых конструкций в инженерной практике, как правило, производится численно в специализированных пакетах, основанных на методе конечных элементов [1–3]. Аналитическое направление исследования и расчета строительных конструкций появилось с развитием систем компьютерной математики. Наиболее распространены такие системы, как Maple [4, 5], Mathematica [6], Maxima [7]. В некоторых случаях аналитические решения получаются в рядах [8, 9], но чаще всего конечные формулы для прогибов или собственных частот колебаний рассчитываются для регулярных систем [10]. Известны решения задачи зависимости прогиба ферм плоских арок и рам [11–16] и пространственных конструкций [17, 18], полученные в системе Maple. Проблемой существования и расчета регулярных статически определимых ферм впервые занялись R.G. Hutchinson и N.A. Fleck [19, 20], назвав поиск таких конструкций «охотой».

В настоящей работе предлагается регулярная статически определимая пространственная ферма сооружения башенного типа (рис. 1). Высота каждой горизонтальной секции (панели) равна  $h$ . Каждая панель состоит из шести раскосов длиной  $\sqrt{a^2 + h^2}$  и трех стоек высотой  $h$ . В основании башни шесть стоек-опор, один сферический шарнир  $A$  и один цилиндрический  $B$ . Купол башни образуют три стержня длиной  $\sqrt{4a^2/3 + h^2}$ .

Ставится задача вывести формулу зависимости прогиба вершины  $C$  от действия нагрузок на купол или на узлы боковых сторон (рис. 2).

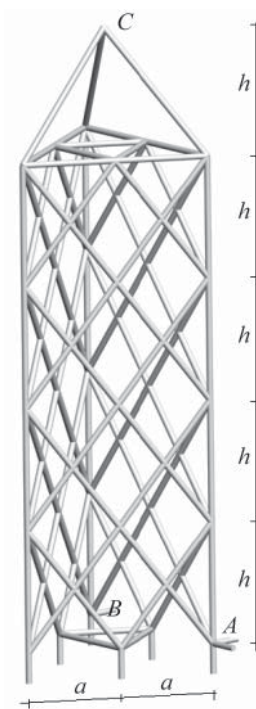


Рис. 1. Схема башни,  $n = 4$

Fig. 1. Tower scheme,  $n = 4$

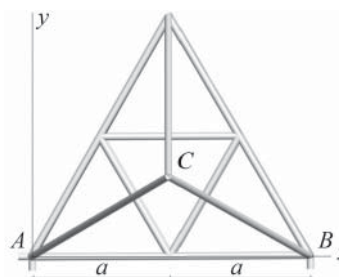


Рис. 2. Размеры фермы и оси координат

Fig. 2. Truss dimensions and coordinate axes

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Расчет усилий в стержнях

Общее число стержней в ферме  $n_r = 9n + 21$ , не включая девять опорных стержней, принятых условно недеформируемыми. Усилия в стержнях фермы определяются методом вырезания узлов [11]. Для этого составляется система уравнений равновесия всех узлов в проекции на три оси координат. В систему уравнений в качестве неизвестных входят и реакции опор. Матрица системы уравнений состоит из направляющих косинусов усилий, значения которых вычисляются по координатам узлов и порядку соединения стержней в узлах. Стержни и узлы нумеруются (рис. 3). Начало координат размещается в опоре  $A$ . Координаты внутренних узлов в программу заносятся в циклах:

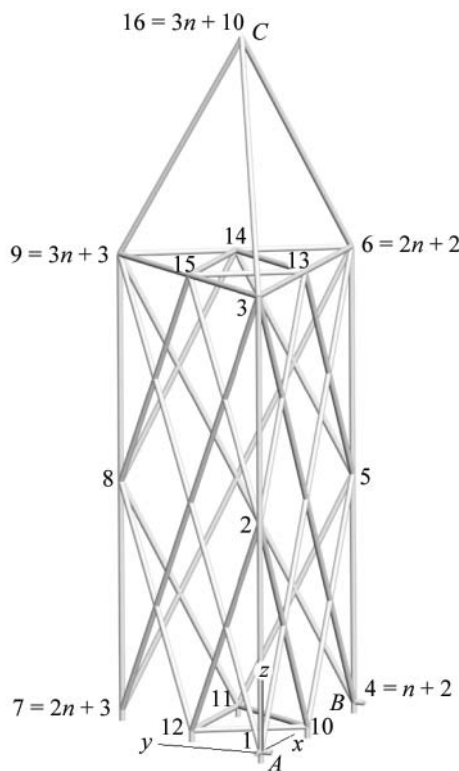


Рис. 3. Нумерация узлов фермы,  $n = 2$

Fig. 3. Numbering of truss nodes,  $n = 2$

$$\begin{aligned} x_i &= 0, \quad y_i = 0, \quad z_i = h(i-1); \\ x_{i+n+1} &= 2a, \quad y_{i+n+1} = 0, \quad z_{i+n+1} = h(i-1); \\ x_{i+2n+2} &= a, \quad y_{i+2n+2} = a\sqrt{3}, \\ z_{i+2n+2} &= h(i-1), \quad i = 1, \dots, n+1; \\ x_{3n+4} &= a, \quad y_{3n+4} = 0, \quad z_{3n+4} = 0; \\ x_{3n+5} &= 3a/2, \quad y_{3n+5} = a\sqrt{3}/2, \quad z_{3n+5} = 0; \\ x_{3n+6} &= a/2, \quad y_{3n+6} = a\sqrt{3}/2, \quad z_{3n+6} = 0; \\ x_{3n+6+i} &= x_{3n+3+i}, \quad y_{3n+6+i} = y_{3n+3+i}, \\ z_{3n+6+i} &= nh, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Координата вершины, перемещения которой разыскиваются:

$$\begin{aligned} x_{3n+10} &= a, \quad y_{3n+10} = a\sqrt{3}/3, \\ z_{3n+10} &= h(n+1). \end{aligned}$$

Каждому стержню фермы ставится в соответствие список номеров его концов. Фактически это придает стержню векторную запись, однако выбор ориентации стержня на решение не влияет. Начало и конец стержня могут быть произвольными. Номера концов стержней имеют форму ориентированных списков:  $\Phi_i, i = 1, \dots, n_r$ . Стержни, например трех боковых стоек башни, кодируются в цикл:

$$\begin{aligned} \Phi_{i+n(j-1)} &= [i + (n+1)(j-1), i + (n+1)(j-1) + 1], \\ j &= 1, \dots, 3, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Матрица системы уравнений равновесия узлов состоит из направляющих косинусов усилий:

$$g_{v,i} = \frac{v\Phi_{i,1} - v\Phi_{i,2}}{l_i}, \quad i = 1, \dots, n_r.$$

Здесь первый индекс  $v$  означает номер оси проекции  $v = x, y, z$ , второй индекс — номер стержня.

Длина стержня:  $l_i = \sqrt{\sum_{v=x,y,z} (v\Phi_{i,1} - v\Phi_{i,2})^2}$ . Матрица системы уравнений равновесия узлов состоит из следующих элементов:

$$\begin{aligned} G_{3\Phi_{i,1}-2+j,i} &= g_{j,i}; \quad G_{3\Phi_{i,2}-2+j,i} = -g_{j,i}; \\ j &= 1, 2, 3, \quad i = 1, \dots, n_r. \end{aligned}$$

Принято обозначение:  $j$  — номер осей  $x, y, z$  соответственно.

Система уравнений равновесия узлов имеет матричный вид:  $\mathbf{GS} = \mathbf{T}$ , где  $\mathbf{S}$  — вектор, содержащий неизвестные усилия и реакции опор. Вектор нагрузок  $\mathbf{T}$  имеет длину  $n_r$ . Нагрузки, приложенные к узлу  $i$  в проекции на ось  $x$ , записываются в элементы  $T_{3i-2}$ , на ось  $y$  — в элементы  $T_{3i-1}$ . Вертикальные внешние силы содержатся в элементах  $T_{3i}$ ,  $i = 1, \dots, K$ . Для решения матричного уравнения в символьной форме в системе компьютерной математики Maple используется метод обратной матрицы:  $\mathbf{S} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{T}$ . По сравнению со специальными операторами пакета LinearAlgebra этот метод более производительный.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Усилия в стержнях

В случае действия на конструкцию равномерной боковой узловой нагрузки, направленной по оси  $y$  (рис. 4), вектор правой части  $\mathbf{T}$  имеет следующие ненулевые компоненты:

$$\begin{aligned} T_{3i-1} &= P, \quad i = 2, \dots, n+1, \quad i = n+3, \dots, 2n+2; \\ & \quad i = 3n+7, \quad 3n+10. \end{aligned}$$



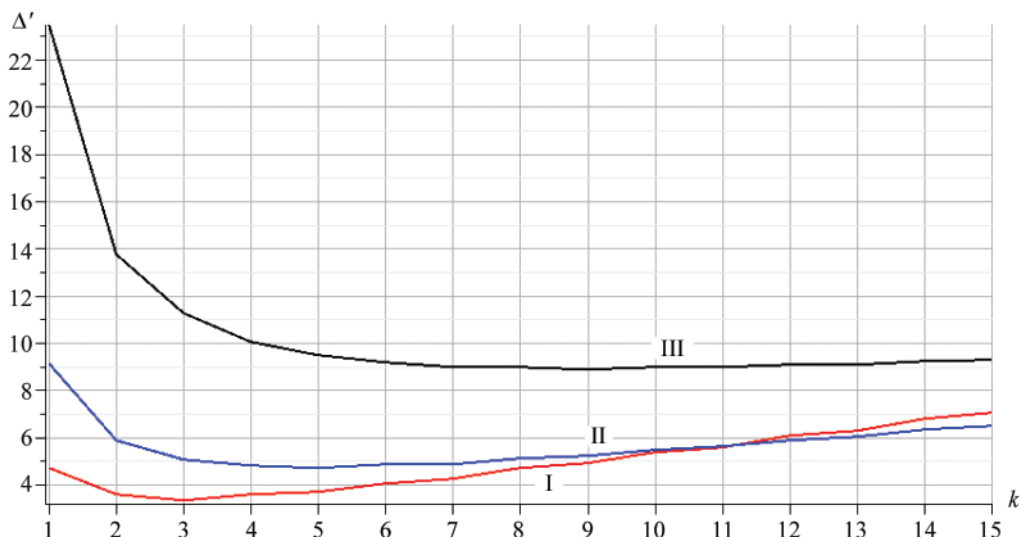


Рис. 5. Зависимость смещения вершины  $C$  от числа панелей: I —  $H = 8$  м; II —  $H = 12$  м; III —  $H = 20$  м  
 Fig. 5. Dependence of the displacement of the vertex  $C$  on the number of panels: I —  $H = 8$  m; II —  $H = 12$  m; III —  $H = 20$  m

$$C_1 = \frac{4(4(-1)^k + 9)k + 7(-1)^k + 25}{18};$$

$$C_2 = \frac{12k^2 + 10k + (-1)^k - 1}{2};$$

$$C_3 = 1/54;$$

$$C_4 = 2 \frac{3k^4 + 8k^3 + 14k^2 + 2(5 - (-1)^k)k - (-1)^k + 1}{3}.$$

Аналогично, при действии ветровой горизонтальной нагрузки по направлению оси  $x$  решение задачи о смещении вершины  $C$  по оси  $x$  имеет вид (2), но с коэффициентами:

$$C_1 = \frac{24(4 - (-1)^k)k - 11(-1)^k + 47}{36};$$

$$C_2 = \frac{264k^2 + 170k + 3(-1)^k - 3}{36};$$

$$C_3 = 1/54;$$

$$C_4 = \frac{36k^4 + 96k^3 + 90k^2 + (18(-1)^k - 1)k + 12(-1)^k - 12}{18}.$$

Введем величину безразмерного прогиба  $\Delta' = EF\Delta_y / P_0H$ , отнесенного к высоте башни вместе с куполом  $H = (n + 1)h$  и суммарной нагрузке  $P_0 = 2(n + 1)P$ . Построим графики зависимости (2) с коэффициентами (3) от числа панелей (рис. 5).

Кривые выходят на наклонную асимптотику, угол наклона которой рассчитывается методами Maple аналитически:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta'/k = 3a/(2H)$ . Значение

числа панелей, при котором относительный прогиб минимальный, зависит от высоты  $h$ . С увеличением общей высоты фермы  $H$  экстремум смещается в сторону больших значений  $k$ . Начиная с некоторых величин  $k$ , порядок кривых меняется. Если в начале графика  $k < 10$  большим высотам соответствует больший прогиб, то при  $k > 10$  кривые I и II меняются местами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложена схема статически определимой осесимметричной пространственной фермы башенного типа с двойной решеткой. В рамках принятой модели конструкции удалось получить расчетные формулы для величины смещений вершины башни и усилий в наиболее нагруженных стержнях в зависимости от числа панелей. Графики построенных зависимостей выявили наличие асимптоты и экстремума решений. Построена картина распределения усилий по стержням фермы, выявляющая критические элементы.

Рассмотренный алгоритм может быть использован для расчета деформаций и напряженного состояния фермы для произвольных нагрузок. Аналитическую форму решения возможно применить для оптимизации конструкции и выбора варианта геометрии при предварительном расчете проектируемого сооружения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малахова А., Мухин М. Проектирование железобетонных конструкций с использованием программного комплекса ЛИРА : учебное пособие. М. : НИУ МГСУ, 2016. 119 с.

2. *Игнатъев В.А., Игнатъев А.В.* Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : Изд-во АСВ, 2022. 306 с.
3. *Ефреюшин С.В., Ефанов А.Р.* Оценка эффективности применения легких стальных тонкостенных конструкций в башенных сооружениях // *Строительная механика и конструкции*. 2021. № 3 (30). С. 26–48. DOI: 10.36622/VSTU.2021.30.3.003. EDN JMRPET.
4. *Сабиров Р.А., Крушенко Г.Г.* Применение метода конечных элементов для расчета шарнирно-стержневых конструкций в системе Maple // *Наука и техника Казахстана*. 2009. № 1. С. 146–153. EDN YQDCBA.
5. *Тиньков Д.В.* Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 5 (57). С. 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6. EDN UHLIHV.
6. *Илькевич М.А., Мусафиров Э.В.* Статический расчет 2D и 3D информационно-строительной модели многоэтажного каркасного здания // *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*. 2019. № 1 (27). С. 11–17. EDN LKCHGP.
7. *Клековкин Г.* Теория графов. Среда Maxima, 2-е изд. : учебное пособие. М. : Юрайт, 2019. 135 с.
8. *Goloskokov D.P., Matrosov A.V.* A superposition method in the analysis of an isotropic rectangle // *Applied Mathematical Sciences*. 2016. Vol. 10. Pp. 2647–2660. DOI: 10.12988/ams.2016.67211
9. *Goloskokov D.P., Matrosov A.V.* Comparison of two analytical approaches to the analysis of grillages // 2015 International Conference “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov (SCP). 2015. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342169
10. *Галишиникова В.В., Игнатъев В.А.* Регулярные стержневые системы: теория и методы расчета. Волгоград : ВолгГАСУ, 2006. EDN QNMMHT.
11. *Бука-Вайваде К., Кирсанов М.Н., Сердюк Д.О.* Calculation of deformations of a cantilever frame planar truss model with an arbitrary number of panels // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 4. С. 510–517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
12. *Dai Qiao.* Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels // *Alfa-Build*. 2021. No. 2 (17). P. 1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1. EDN LNUDDR.
13. *Комерзан Е.В., Свириденко О.В.* Аналитический расчет прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы с произвольным числом панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2021. № 2 (29). С. 29–37. EDN LJWUOW.
14. *Ovsyannikova V.M.* Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels // *Structural Mechanics and Structures*. 2020. № 3 (26). Pp. 13–20. EDN DZCGWV.
15. *Овсянникова В.М.* Зависимость прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы от числа панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 4 (27). С. 16–25. EDN EJKATV.
16. *Суд И.Б.* Вывод формул для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей в системе Maple // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 2 (25). С. 25–32. EDN VIQBNE.
17. *Kirsanov M.N.* Deformations and spatial structure vibrations frequency of the rectangular contour type cover: analytical solutions // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. No. 5 (98). P. 9805. DOI: 10.4123/CUBS.98.5. EDN SEMXJL.
18. *Sviridenko O., Komerzan E.* The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. No. 3 (101). P. 10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.
19. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* Microarchitectured cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
20. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

Поступила в редакцию 28 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 14 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

## REFERENCES

1. Malakhova A., Mukhin M. *Design of reinforced concrete structures using the LIRA software package : tutorial*. Moscow, NRU MGSU, 2016; 119. (rus.).
2. Ignatiev V.A., Ignatiev A.V. *Finite element method in the form of a classical mixed method of structural mechanics (theory, mathematical models and algorithms)*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 306. (rus.).
3. Efrushin S.V., Efanov A.R. Estimation of the efficiency of application of light steel thin-walled structures in tower structures. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 3(30):26-48. DOI: 10.36622/VSTU.2021.30.3.003. EDN JMPPET. (rus.).
4. Sabirov R.A., Krushenko G.G. Application of the finite element method for the calculation of hinged-rod structures in the Maple system. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2009; 1:146-153. EDN YQDCBA. (rus.).
5. Tinkov D.V. Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 5(57):66-73. DOI: 10.5862/MCE.57.6. EDN UHLIHV. (rus.).
6. Ilkevich M.A., Musafirov E.V. Onstatic calculation of 2D and 3D information construction model of a multistory frame building. *Bulletin of the Khakass State University named after N.F. Katanov*. 2019; 1(27):11-17. EDN LKCHGP. (rus.).
7. Klekovkin G. *Graph Theory. Maxima Environment 2nd ed. : textbook*. Moscow, Yurayt Publ., 2019; 135. (rus.).
8. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. A superposition method in the analysis of an isotropic rectangle. *Applied Mathematical Sciences*. 2016; 10:2647-2660. DOI: 10.12988/ams.2016.67211
9. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Comparison of two analytical approaches to the analysis of grillages. *2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP)*. 2015. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342169
10. Galishnikova V.V., Ignatiev V.A. *Regular rod systems: theory and methods of calculation*. Volgograd, VolgGASU, 2006. EDN QNMMHT. (rus.).
11. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517 (rus.).
12. Dai Qiao. Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels. *Alfa-Build*. 2021; 2(17):1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1. EDN LNUDDR.
13. Komerzan E.V., Sviridenko O.V. Analytical calculation of the deflection of a plane external statically undetermined truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 2(29): 29-37. EDN LJWUOW. (rus.).
14. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26): 13-20. EDN DZCGWV. (rus.).
15. Ovsyannikova V.M. Dependence of the deflection of a planar external statically undeterminable truss on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 4(27):16-25. EDN EJKATV. (rus.).
16. Sud I.B. Derivation of formulas for deflection of the girder truss with an arbitrary number of panels in the maple system. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 2(25):25-32. EDN VIOBNE. (rus.).
17. Kirsanov M.N. Deformations and Spatial Structure Vibrations Frequency of the Rectangular Contour Type Cover: Analytical Solutions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 5(98):9805. DOI: 10.4123/CUBS.98.5. EDN SEMXJL.
18. Sviridenko O., Komerzan E. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 101. Article No 10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.
19. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
20. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

Received November 28, 2022.

Adopted in revised form on March 14, 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES:** **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IстинаResearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.02:536.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1039-1054

## Термическая оценка вертикальных ограждающих конструкций с учетом тепловых воздействий

Адхам Иминжанович Гиясов, Егор Вадимович Карасёв

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Тенденция увеличения температуры отмечается не только в городах южного региона Российской Федерации, но и в мире, что обусловлено проблемой глобального потепления. Выявление значений тепловых воздействий на здания и сооружения в аспекте повышения энергоэффективности зданий является приоритетным.

**Материалы и методы.** Методика расчета представлена в виде формульной математической модели и числового метода с помощью программного комплекса. Объект исследования — жилое здание с конструкцией каркасной системы и рамной схемой. Ограждающие конструкции выполнены из газобетонных блоков с устройством мокрого и вентилируемого фасада.

**Результаты.** Представлены качественные и количественные итоги исследования в виде графических расчетов. Получены результаты энергоаудита ограждающих конструкций в условиях нагружений тепловыми воздействиями. Установлены зависимости температуры между поверхностью снаружи ограждающей конструкции и внутри. Определены критические температуры на поверхности ограждающих конструкций снаружи помещения, при которых на поверхности внутри наблюдаются неблагоприятные условия. Решены задачи в области определения угрозы внешних тепловых факторов на ограждающие конструкции с учетом их уязвимых частей при применении двух методов борьбы с тепловыми нагрузками в условиях нестационарной теплопередачи.

**Выводы.** Разработан порядок расчета с применением метода конечных элементов при помощи программного комплекса в условиях тепловых воздействий на ограждающие конструкции, который позволяет прогнозировать температурные сдвиги на поверхности стены внутри помещения. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков рекомендуемых конструкций, применяемых для конструирования оболочки здания. Выявлены условия повышения энергоэффективности при применении двух методов борьбы с тепловыми нагрузками в условиях нестационарной теплопередачи, разработаны рекомендации для повышения энергоэффективности ограждающих конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** здание, помещение, стена, фасад, температура, энергоэффективность, микроклимат, материал с изменяемым фазовым состоянием (МИФС), вентилируемый фасад, лучистая энергия солнца, тепловое воздействие

*Благодарности.* Исследование проводилось в соответствии с планом научно-исследовательской работы кафедры проектирования зданий и сооружений НИУ МГСУ «Функция, конструкция и среда в архитектуре зданий» в аспекте проблемы «Тепловая безопасность в изменении климата».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Гиясов А.И., Карасёв Е.В. Термическая оценка вертикальных ограждающих конструкций с учетом тепловых воздействий // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1039–1054. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1039-1054

Автор, ответственный за переписку: Адхам Иминжанович Гиясов, adham52@mail.ru.

## Thermal assessment of vertical enclosing structures taking into account thermal effects

Adham I. Giyazov, Egor V. Karasev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The hot and unfavorable climate, affecting both the person and the building as a whole, increases more and more every year. This trend of temperature increase is noted not only in the cities of the southern region of the Russian Federation, but also in the world, which is caused by the problem of global warming. Identification of the values of thermal effects on buildings and structures in the aspect of increasing the energy efficiency of buildings is a priority.

**Materials and methods.** The calculation method is presented in the form of a formulaic mathematical model and a numerical method using a software package. The object of the study is a residential building with a frame system construction and frame scheme. Enclosing structures are made of aerated concrete blocks with the device of wet and ventilated facade.

**Results.** Qualitative and quantitative results of the study are presented in the form of graphical calculations. The results

of the energy audit of enclosing structures under conditions of loading by thermal influences are obtained. Temperature dependences between the surface outside of the envelope and inside are established. Critical temperatures on the surface of enclosing structures outside the room at which unfavorable conditions are observed on the surface inside are determined. Problems in the field of determining the threat of external thermal factors on the enclosing structures taking into account their vulnerable parts in the application of two methods of thermal loads control in the conditions of unsteady heat transfer have been solved.

**Conclusions.** A calculation procedure using the finite element method by means of a software package under conditions of thermal effects on the enclosing structures has been developed, which allows to predict the temperature shifts on the wall surface inside the room. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the recommended structures used for building envelope design is carried out. The conditions for energy efficiency improvement in the application of two methods of thermal load control under unsteady heat transfer conditions have been identified, and recommendations for improving the energy efficiency of building envelope structures have been developed.

**KEYWORDS:** building, room, wall, facade, temperature, energy efficiency, microclimate, phase change material (MIFS), ventilated facade, solar radiant energy, thermal effect

*Acknowledgments.* The work was carried out in accordance with the plan of research work of the Department of Design of Buildings and Structures of NRU MGSU focused on the “Function, Construction and Environment in Building Architecture” in the aspect of the problem “Thermal safety in climate change”.

**FOR CITATION:** Giyazov A.I., Karasev E.V. Thermal assessment of vertical enclosing structures taking into account thermal effects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1039-1054. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1039-1054 (rus.).

*Corresponding author:* Adham I. Giyazov, adham52@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности здания — это процесс, при котором затрачиваемая энергия на отопление помещения в холодном и теплом периоде уменьшается с помощью применения эффективных в области теплозащитных механизмов определенных материалов и конструкций [1–3]. Однако при повышении энергоэффективности здания не ограничиваются одним только понижением энергии для отопления в условиях низких температур региона, также нужно обеспечить теплоустойчивость конструктивной оболочки здания по отношению к избыточному теплу снаружи, формируемому под воздействием повышенных температур и солнечной радиации [4]. Данные строения, в сравнении с типовым решением, отличаются тем, что во время их эксплуатации уменьшается затрачиваемая энергия, возрастает комфортность пребывания людей внутри помещений, основополагающим фактором является экологичность.

В исследованиях на теплоустойчивость здания рекомендуется производить расчеты на каждую ограждающую конструкцию оболочки. Это обусловлено тем, что здание работает как единая система и любой недочет в вертикальной или горизонтальной конструкции оболочки будет снижать его энергоэффективность. Так, например, при установке мощных обогревательных или охлаждающих установок они будут показывать меньший КПД, если в устройствах стен неправильно запроектирован теплоизоляционный слой или неверно подобрана оконная или балконная система [5].

Одна из главных особенностей проектирования энергоэффективного здания — экология [6]. Затрачивая меньшие ресурсы на отопление или охлаждение помещений, достигается снижение по-

требности в использовании большого количества невозобновляемых ресурсов.

Нестационарную теплопередачу через ограждающие конструкции при совместном действии температуры внешней среды, пристенного слоя воздуха и теплового воздействия при инсоляции наружной поверхности следует рассчитать, пользуясь понятием условной температуры наружного воздуха (до 60–65 °С), учитывающей составляющие температуры пристенного слоя воздуха и температурной надбавки, эквивалентной действию солнечной радиации. В течение суток значения температуры внешней среды, пристенного слоя воздуха и действие солнечной радиации меняются. Имея соответствующий сдвиг по времени, колебания условной температуры определяют степень затухания температурных колебаний в ограждающих конструкциях [7].

Ключевым критерием энергоэффективного проектирования зданий служит снижение теплопотерь из помещений или повышение теплоустойчивости к излишней энергии, поступающей из окружающей среды в помещение. Одним из главных факторов таких тепловых потерь и поступления тепла являются ограждающие конструкции с уязвимыми местами (оконными и балконными проемами, дверями, горизонтальными и вертикальными швами сопрягаемых конструкций и т.д.) [3].

С целью изучения и оценки энергоэффективности в качестве примера принято жилое здание с типовым объемно-планировочным и конструктивным решением. Жилое здание представляет собой конструкцию каркасной системы с рамной схемой. Пространственная жесткость достигается совместной работой колонн и ригелей. Стены выполнены из газобетонных блоков с устройством мокрого фасада. Здание состоит из фасадной части с балконными и оконными узлами, а также глухой стеной.

В расчетах будут рассматриваться ограждающие конструкции с наиболее уязвимыми местами с точки зрения теплотехнических характеристик. Для исследуемого здания ограждающая конструктивная оболочка имеет следующие характерные «слабые места»:

- оконные проемы;
- балконные проемы;
- узел сопряжения балконной плиты с внутренним междуэтажным перекрытием здания.

Для сравнительного анализа полученных результатов составлена табл. 1, показывающая процентное соотношение слабых мест от общей поверхности ограждающей оболочки.

**Табл. 1.** Процентное соотношение уязвимых мест оболочки здания

**Table 1.** Percentage of vulnerabilities in the building envelope

Наименование Name	Площадь, м <sup>2</sup> Area, m <sup>2</sup>	Процентное соотношение, % Percentage, %
Ограждающая оболочка Enclosing shell	8104,62	100
Оконные проемы Window openings	1188	14,66
Балконные проемы Balcony openings	1801,8	22,23
Узел плиты перекрытия Floor slab assembly	1306,8	16,12
Общее соотношение слабых мест ко всей ограждающей оболочке здания General ratio of weak points to the entire building envelope		53,01

Уязвимые места ограждающей оболочки здания составляют 53,01 %. В теории, при установке теплоизоляционных конструкций в данные места, значительно повышается общая энергоэффективность ограждающей конструкции.

**Табл. 2.** Характеристики исследуемой ограждающей конструкции

**Table 2.** Characteristics of the investigated building envelope

Материал Material	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·К) Heat capacity, J/(kg·K)
Газобетон автоклавный Autoclaved aerated concrete	0,096	400	840
Утеплитель (каменная вата) Insulation (stone wool)	0,036	145	920
Штукатурка / Plaster	0,26	1000	880
Стеклопакет / Double glazing	0,76	2500	840
Оконное обрамление Window frame	0,2	1600	1050
Бетон / Concrete	1,52	2400	1130

В табл. 2 приведены материалы с их характеристиками, которые потребуются для дальнейших исследований.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на ограждающих конструкциях стен (стены с уязвимыми частями) жилого здания. Климатические параметры представляют собой среднестатистические метеорологические данные южного региона Российской Федерации. В условиях климата южного региона на здания и их ограждающие конструкции, помимо теплового воздействия, влияет нагрузка в виде лучистой энергии солнца. Солнечная радиация, как и температура, нестационарная величина, которая изменяется в течение дня. Поэтому в исследованиях заданы одновременно оба фактора климата — значение температуры воздуха и солнечная радиация, обуславливающие результирующую температуру наружной поверхности ограждающей конструкции.

Расчет ограждающих конструкций методом конечных элементов (МКЭ) при помощи программного комплекса (ПК) выполняется формулированием математической модели на теплоустойчивость конструкции с учетом температурной и радиационной нагрузки<sup>1</sup>.

Моделирование и теплотехнический расчет ограждающей конструкции осуществляется с применением ПК COMSOL Multiphysics 5.5 [8].

Исходными данными служат сведения, приведенные в вводной части. Расчет производится по нестационарным условиям теплопередачи при переменной температуре наружной поверхности стены, обусловленной за счет изменения температуры воздуха внешней среды и условия ее инсоляции.

Первый рассматриваемый объект ограждающей конструкции представляет собой модель стены с оконным проемом, показанной на рис. 1. Размеры стены 3000 × 3000 мм и оконного проема

<sup>1</sup> СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М., 2012.

1500 × 1500 мм. Материалы оконного проема — ПВХ с двойным стеклопакетом, стыки загерметизированы монтажной пеной.

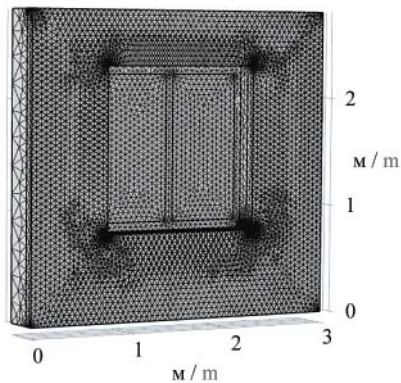


Рис. 1. Модель стены с оконным проемом с сеткой конечных элементов

Fig. 1. Wall model with a window opening with finite element mesh

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конечный вид графического расчета представлен на рис. 2. Эта иллюстрация показывает, что даже хорошо загерметизированный стык подвержен тепловым нагрузкам, которые способствуют нагреву поверхности стены внутри помещения. Это связано с тем, что тепловые потоки проходят не только по поверхности откоса оконного проема, но и уходят вглубь слоев глухой части стены.

В настоящей статье уделяется особое внимание передаче тепла через откосы уязвимых мест ограждающей конструкции.

Выводом данных вычислений стал табличный результат (табл. 3), показывающий зависимость термического режима на поверхности ограждающей конструкции (глухой части стены) внутри помещения от температуры, возникающей на поверхности снаружи помещения при наличии оконного проема.

Для следующего этапа исследований и сравнительных результатов из табл. 3 представляет интерес одно значение, при котором температура внутренней поверхности ограждающей конструкции достигает выше 28 °С. Это обусловлено нормативным документом<sup>2</sup>. В целях обеспечения комфортного пребывания людей в помещении температура внутренней поверхности стены в теплый период года не должна превышать 28 °С. В расчетах температура воздуха помещения была принята 20 °С. Неблагоприятная температура наружной поверхности достигается при 42 °С и выше, что негативно сказывается на тепловом состоянии людей, пребывающих в помещении жилого здания.

Аналогичный расчет производится для ограждающей конструкции стены с балконным узлом. Ее геометрические размеры — 6000 × 3000 мм (без учета второго этажа, он дан для наглядности исследований). Размеры оконного проема в этом узле составляют 1400 × 1300 мм и дверного проема 2200 × 700 мм. Балконный узел ограждающей конструкции рассматривается в виде вертикальной стены с балконной плитой в сопряжении с плитой перекрытия помещения. Он также подвергается тепловым воздействиям и требует отдельного внимания в расчетах нестационарной теплопередачи. Более подробный анализ бетонного узла будет выполнен после расчета балконного стыка, который

<sup>2</sup> СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

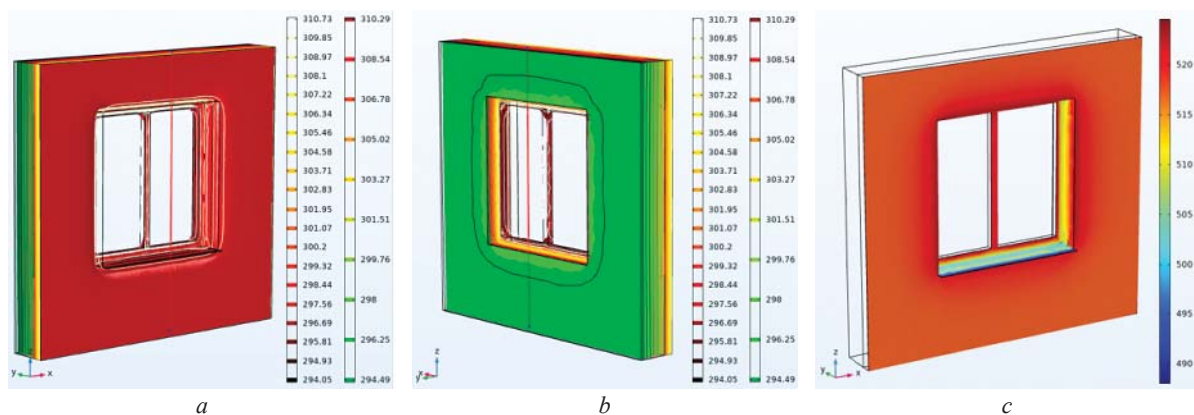


Рис. 2. Графический результат исследования стены с оконным проемом при нестационарной теплопередаче: *a* — наружная поверхность; *b* — внутренняя поверхность; *c* — распределение солнечного излучения по наружной поверхности ограждающей конструкции

Fig. 2. Graphical result of the study of a wall with a window opening with non-stationary heat transfer: *a* — outer surface; *b* — inner surface; *c* — distribution of solar radiation over the outer surface of the enclosing structure

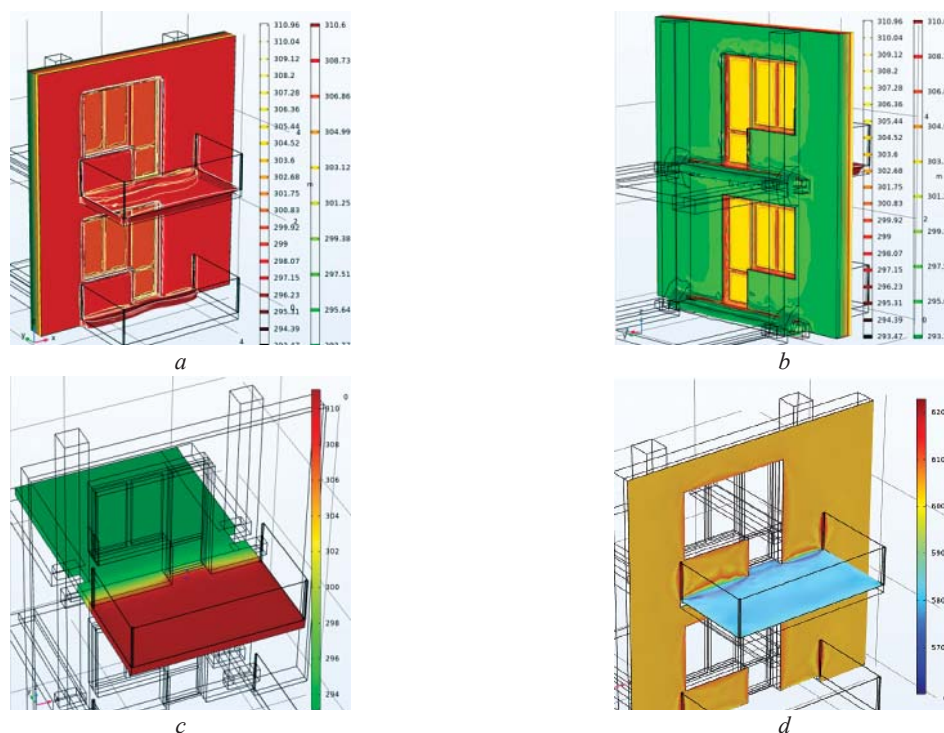
представлен на рис. 3. Здесь, помимо откосов окна и двери, тепловому потоку подвергается узел сопряжения низа дверного проема с бетонной плитой перекрытия.

Результаты вычислений балконного узла представлены в табл. 4. Из этих расчетов понятно, что при достижении на поверхности ограждающей стены снаружи помещения 44 °С и более внутренняя

**Табл. 3.** Результат теплотехнического расчета стены с оконным проемом

**Table 3.** The result of the thermotechnical calculation of a wall with a window opening

Характеристика ограждающей конструкции Characteristics of building envelope	Размеры ограждающей конструкции, мм Dimensions of building envelope, mm	Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения τ, °С The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room τ, °C	Температура в слоях стены на удалении 200 мм от кромки оконного проема τ, °С Temperature in the layers of the wall at a distance of 200 mm from the edge of the window opening τ, °C	Температура внутренней поверхности стены τ, °С The temperature of the inner surface of the wall τ, °C
Стена из газобетона с утеплителем Aerated concrete wall with insulation	300 × 300 × 280	30	26,25	23,00
		32	27,14	23,43
		34	28,04	23,86
		36	29,02	24,33
		38	30,16	26,63
		40	33,50	27,53
Окно — ПВХ, оформление с двойным стеклопакетом Window — PVC framing with double glazing	1500 × 1500	42	36,68	28,11
		44	38,21	28,85
		46	39,74	29,58
		48	41,26	30,32
		50	42,79	31,05



**Рис. 3.** Графический результат исследования балконного узла: *a* — наружная поверхность; *b* — внутренняя поверхность; *c* — плита перекрытия; *d* — распределение солнечной радиации на поверхности плиты балконного узла  
**Fig. 3.** Graphical result of the study of the balcony node: *a* — outer surface; *b* — inner surface; *c* — floor slab; *d* — distribution of solar radiation on the surface of the balcony assembly slab

Табл. 4. Результат теплотехнического расчета стены с балконным оконным и дверным проемом  
 Table 4. The result of the heat engineering calculation of a wall with a balcony window and doorway

Характеристика ограждающей конструкции Characteristics of building envelope	Размеры ограждающей конструкции, мм Dimensions of building envelope, mm	Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения $\tau$ , °C The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room $\tau$ , °C	Температура в слоях стены на удалении 200 мм от кромки оконного проема $\tau$ , °C Temperature in the layers of the wall at a distance of 200 mm from the edge of the window opening $\tau$ , °C	Температура внутренней поверхности стены $\tau$ , °C The temperature of the inner surface of the wall $\tau$ , °C
Стена из газобетона с утеплителем Aerated concrete wall with insulation	6000 × 3000 × 280	30	26,61	23,56
		32	27,90	24,25
		34	29,23	24,97
		36	30,56	25,69
Окно — ПВХ, блок с двойным стеклопакетом Window — PVC block with double glazing	1400 × 1300	38	31,89	26,35
		40	33,20	27,12
		42	34,47	27,79
		<b>44</b>	<b>35,80</b>	<b>28,51</b>
Дверь — ПВХ, блок Door — PVC block	2200 × 700	46	37,13	29,23
		48	38,47	29,94
		50	39,80	30,66

поверхность нагревается до неблагоприятной температуры 28 °C и более.

Следующий расчет на вертикальную поверхность стены проводится для узла стыка балконной плиты и междуэтажной плиты перекрытия, расположенного в слое стены. Геометрические размеры плиты перекрытия помещения составляют 3000 × 3000 × 180 мм и выполнены по технологии типа «КУБ», балконной плиты — 3000 × 1500 × 120 мм. На рис. 3, с, d представлен графический визуальный результат теплотехнического расчета данного сопряжения балконной плиты перекрытия с междуэтажным перекрытием и стеной здания в виде температурного поля. Результат теплотехнического расчета приведен в табл. 5. В условиях стыка балконной плиты и междуэтажной плиты перекрытия отмечается, что при температуре 45–46 °C на поверхности стены снаружи помещения, на поверхности стены внутри достигается неблагоприятная температура, превышающая 28 °C.

В итоге теплотехнических исследований программным комплексом получены качественные картины с количественными подтвержденными результатами термического режима ограждающей конструкции в целом и в уязвимых частях под влиянием температурных воздействий внешней среды и условия инсоляции поверхности стены фасадов.

Следующий этап исследования — поиск и разработка рекомендаций по повышению показателей энергоэффективности уязвимых зон теплозащит-

ной конструктивной оболочки здания. С этой целью исследованы и проанализированы следующие конструктивные решения ограждения зданий.

Рассматриваются две энергоэффективные конструкции.

Первая — это навесной вентилируемый фасад. Данный вид конструкции широко распространен на российском строительном рынке. Его энергоэффективность заключается в том, что воздушная прослойка с помощью конвективных потоков, создаваемых отверстиями снизу и сверху здания за счет притока и оттока воздуха, производит теплосъем конструктивных слоев, а также способствует влагосъему, тем самым понижая теплопередачу через ограждающую конструкцию [9]. Применение навесного вентилируемого фасада обязывает архитекторов-инженеров проектировать их по всему зданию, что порой является экономически невыгодным решением.

Второй метод повышения энергоэффективности ограждающих конструкций — применение материала с изменяемым фазовым состоянием (МИФС) или другое название phase change material (PCM) [10, 11]. Этот материал широко распространен за рубежом. Достоинства состоят в том, что его можно использовать в определенных выборочных уязвимых участках и зонах конструкций и он имеет малую толщину. Например, толщина конструкции вентилируемого фасада, применяемая в настоящем исследовании, — 160 мм, а МИФС, упакованный в контейнеры, обладает толщиной 20 мм.

**Табл. 5.** Результат теплотехнического расчета стены в условиях стыка балконной плиты и междуэтажной плиты перекрытия**Table 5.** The result of the thermal engineering calculation of the wall in the conditions of the junction of the balcony slab and the interfloor floor slab

Характеристика ограждающей конструкции Characteristics of building envelope	Размеры ограждающей конструкции, мм Dimensions of building envelope, mm	Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения $\tau$ , °С The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room $\tau$ , °С	Температура в слоях стены на удалении 200 мм от кромки оконного проема $\tau$ , °С Temperature in the layers of the wall at a distance of 200 mm from the edge of the window opening $\tau$ , °С	Температура внутренней поверхности стены $\tau$ , °С The temperature of the inner surface of the wall $\tau$ , °С
Стена из газобетона с утеплителем Aerated concrete wall with insulation	6000 × 3000 × 280	30	26,92	23,35
		32	28,5	24,15
Окно — ПВХ, обрамление с двойным стеклопакетом Window — PVC framing with double glazing	1400 × 1300	34	30,25	24,48
		36	31,32	25,18
		38	32,97	25,60
Дверь — ПВХ, блок Door — PVC, block	2200 × 700	40	35,03	26,59
		42	36,01	27,12
Балконная плита перекрытия. Междуэтажное перекрытие (плита «КУБ») Balcony floor slab. Interfloor overlap (plate “CUBE”)	3000 × 3000 × 160	44	37,28	27,87
		46	<b>40,24</b>	<b>28,91</b>
		48	39,75	29,76
		50	41,15	30,17

Расчет будет произведен при устройстве вентилируемого фасада на газобетонный конструктивный слой. Характеристика конструкции для расчета представлена в табл. 6.

Рассчитываются температурные колебания при нестационарной теплопередаче с применением навесного вентилируемого фасада. Результаты расчета для каждого исследуемого узла приведены в табл. 7.

При использовании навесного вентилируемого фасада удастся значительно повысить энергоэффективность ограждающей конструкции. Так, например, без устройства вентилируемого фасада неблагоприятная температура на наружной поверхности стены у оконного узла отмечается при температуре 42 °С, а при устройстве энергоэффективной вентилируемой конструкции при 58 °С.

**Табл. 6.** Характеристика навесного вентилируемого фасада**Table 6.** Characteristics of a hinged ventilated facade

Материал Material	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·К) Heat capacity, J/(kg·K)
Газобетон автоклавный Autoclaved aerated concrete	0,096	400	840
Утеплитель / Insulation	0,036	145	920
Металлические конструкции (профили, кронштейны) Metal structures (profiles, brackets)	209,3	7130	897
Воздушная прослойка / Air gap	0,022	1,28	1007
Керамогранит / Porcelain stoneware	0,88	2200	1400

Табл. 7. Результат расчета исследуемых узлов ограждающей конструкции с применением навесного вентилируемого фасада

Table 7. The result of the calculation of the studied units of the enclosing structure using a hinged ventilated facade

Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения $\tau$ , °С The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room $\tau$ , °С	Температура на поверхности внутри помещения при оконном проеме $\tau$ , °С The temperature on the surface inside the room at the window opening $\tau$ , °С	Температура на поверхности внутри помещения при балконном проеме $\tau$ , °С The temperature on the surface inside the room with a balcony opening $\tau$ , °С	Температура на поверхности внутри помещения при балконной плите $\tau$ , °С The temperature on the surface inside the room with a balcony slab $\tau$ , °С
30	22,8	23,05	22,5
32	23,36	23,38	23,00
34	23,71	23,89	23,51
36	24,07	24,11	24,03
38	24,41	24,49	24,57
40	24,73	24,98	25,01
42	25,09	25,19	25,59
44	25,39	25,44	26,10
46	25,82	25,86	26,99
48	26,13	26,26	27,6
49	–	–	<b>28,22</b>
50	26,47	26,78	–
52	26,93	27,05	–
54	27,2	27,45	–
56	27,78	27,91	–
58	<b>28,07</b>	<b>28,23</b>	–

В исследованиях в узле сопряжения балконной плиты перекрытия из-за затруднения применения фасадного устройства использовано традиционное конструктивное решение заполнения стыка с помощью каменной плиты утеплителя размером 160 × 150 мм. Поэтому энергоэффективность ограждающей конструкции увеличилась незначительно в сравнении с результатами вентилируемого фасада.

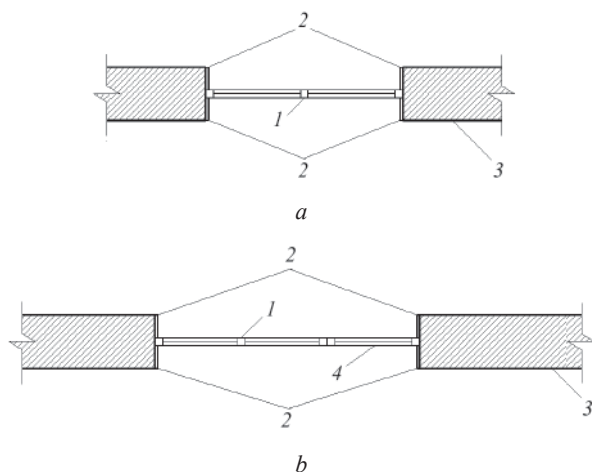
Расчет с применением МИФС (PCM) — относительно новое исследование для российского строительного рынка. Много исследований приведено в зарубежной литературе [12–15]. В некоторых источниках представлены расчеты с результатами повышения энергоэффективности здания на 70 % [16]. Характеристика используемого МИФС приведена в табл. 8.

Табл. 8. Характеристика PCM RT42

Table 8. Characteristics of PCM RT42

Процесс/Характеристика Process/Characteristic	Значение/Обозначение Meaning/Designation
Область плавления / Melting area	38–43 °С
Область затвердевания / Solidification area	43–37 °С
Теплоаккумулирующая способность / Heat storage capacity	165 кДж/кг / kJ/kg
Удельная теплоемкость / Specific heat	2 кДж/кг·К / kJ/kg·K
Плотность твердого тела / Solid Density	880 кг/м³ / kg/m³
Плотность в жидком состоянии / Density in liquid state	760 кг/м³ / kg/m³
Теплопроводность (обе фазы) / Thermal conductivity (both phases)	0,2 Вт/м·К / W/m·K
Температура воспламенения / Flash point	186 °С
Максимальная рабочая температура / Maximum operating temperature	72 °С
Размеры конструкции / Construction dimensions	500 × 200 × 20 мм / mm
Тип наполнителя PCM Type of filler PCM	Органический (на основе парафина) Organic (paraffin based)

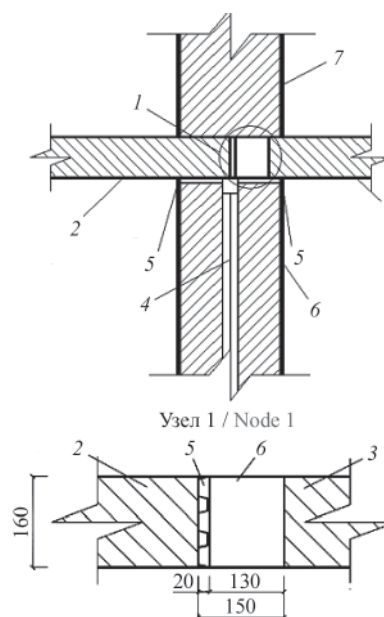
МИФС устанавливается по всем откосам балконного и оконного блока из ПВХ (рис. 4). Данный материал крепится на газобетонный конструктивный слой при помощи термосиликонового клея [17, 18].



**Рис. 4.** Применение МИФС к исследуемым узлам ограждающей конструкции с оконным (а); оконным и дверным блоком (б); 1 — окно из ПВХ; 2 — МИФС с ПВХ накладкой; 3 — существующая стена; 4 — дверь из ПВХ

**Fig. 4.** Application of MIFS to the investigated units of the enclosing structure with a window (a); window and door block (b); 1 — PVC window; 2 — MIFS with PVC lining; 3 — existing wall; 4 — PVC door

В стыке балконной плиты перекрытия используется МИФС с макрокапсульным методом упаковывания. Это связано с тем, что метод упаковывания МИФС не сказывается на изменении теплопередачи материала, важен тип наполнителя, он идентичный указанному в работе [19]. Расположение МИФС в стыке балконной плиты перекрытия показан на рис. 5.



**Рис. 5.** Устройство МИФС в стыке балконной плиты с междуэтажным перекрытием: 1 — узел; 2 — балконная плита; 3 — междуэтажное перекрытие; 4 — окно из ПВХ; 5 — слой МИФС; 6 — утеплитель; 7 — существующая стена

**Fig. 5.** MIFS device at the junction of a balcony slab with an interstorey ceiling: 1 — node; 2 — balcony slab; 3 — interstorey overlap; 4 — PVC window; 5 — MIFS layer; 6 — insulation; 7 — existing wall

Полученные авторами результаты исследования термических характеристик узлов ограждающей конструкции с применением МИФС при нестационарной теплопередаче приведены в табл. 9.

Отмечаются привлекательные результаты вычисления. Градация температур получается меньше, чем с вентилируемым фасадом, но при толщине МИФС 20 мм результат теплопередачи оказался выше. Более подробные сравнительные вычисления будут проведены далее.

**Табл. 9.** Результат расчета исследуемых узлов ограждающей конструкции с применением МИФС

**Table 9.** The result of the calculation of the investigated nodes of building envelope using MIFS

Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения $\tau$ , °C The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при оконном проеме $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room at the window opening $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при балконном проеме $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room with a balcony opening $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при балконной плите $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room with a balcony slab $\tau$ , °C
30	22,72	22,43	22,5
32	23,24	24,13	23,00
34	23,78	24,63	23,5
36	24,31	25,53	24,0

Результирующая температура на поверхности ограждающей конструкции снаружи помещения $\tau$ , °C The resulting temperature on the surface of building envelope outside the room $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при оконном проеме $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room at the window opening $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при балконном проеме $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room with a balcony opening $\tau$ , °C	Температура на поверхности внутри помещения при балконной плите $\tau$ , °C The temperature on the surface inside the room with a balcony slab $\tau$ , °C
38	25,84	26,23	24,5
40	25,95	26,29	24,63
42	26,09	26,38	24,75
44	26,21	26,50	24,88
46	26,33	26,63	24,96
47	27,68	27,05	25,3
48	<b>28,03</b>	27,88	25,09
50	29,11	<b>29,45</b>	25,61
52	30,21	30,87	26,11
54	31,12	31,96	27,34
56	–	–	<b>28,76</b>

Для уточнения результатов выполненных исследований осуществляется следующий сравнительный расчет и анализ. Результаты расчета приведены в виде графиков с выражением, в процентном эквиваленте степень повышения энергоэффективности каждого узла. На рис. 6 представлен график, показывающий зависимость температур внутренней и наружной поверхности оконного и балконного узла ограждающих конструкций.

Графики температурных зависимостей указывают, что наилучшим решением в повышении энергоэффективности конструкции служит вентилируемый фасад. Получается, что при применении вентилируемого фасада энергоэффективность оконного проема повышается на 35,7% и балконного — на 38%. В случае применения МИФС для оконного и балконного проема их энергоэффективность составит в среднем 16%.

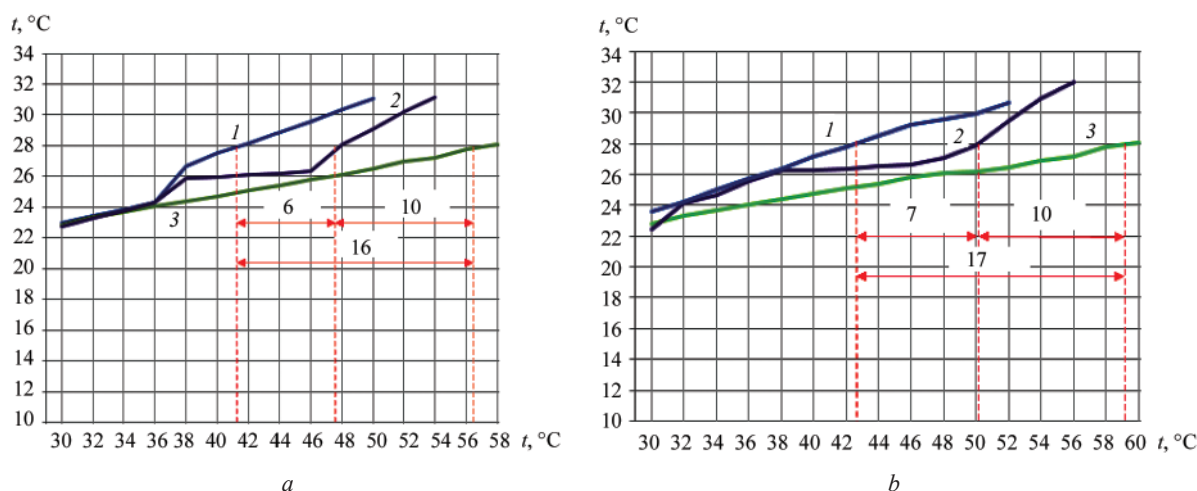


Рис. 6. Зависимость между температурой внутренней поверхности стены и результирующей температурой наружной поверхности стены оконного (а); балконного узла (b); 1 — конструкция с мокрым фасадом; 2 — конструкция с применением МИФС; 3 — конструкция с вентилируемым фасадом

Fig. 6. The relationship between the temperature of the inner surface of the wall and the resulting temperature of the outer surface of the wall of the window (a); balcony unit (b); 1 — design with a wet facade; 2 — design using MIFS; 3 — design with a ventilated facade

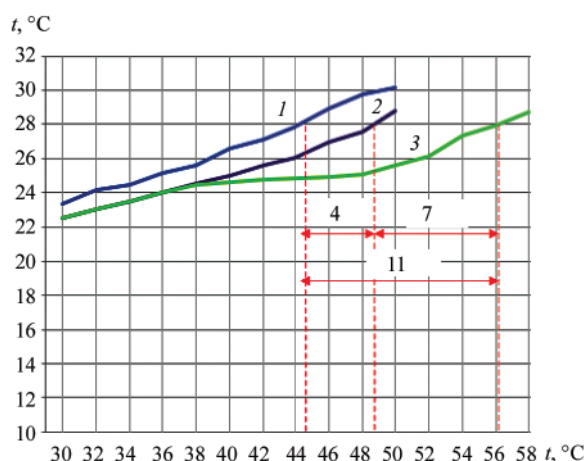
Стоит отметить, что в расчетах использовалась конструкция вентилируемого фасада толщиной 160 мм, а конструкция МИФС составила 20 мм. Если сравнивать повышение энергоэффективности при равной толщине, то МИФС будет эффективнее вентилируемого фасада на 15–25 % [20].

Следующий анализ производится для стыка балконной и внутренней плиты перекрытия. Применялись материалы с утеплителем из каменных плит и МИФС. Влияние на энергоэффективность ограждения данных конструктивных решений продемонстрировано на рис. 7.

Анализ представленных на графике результатов показывает, что наилучшим решением для узла плит перекрытий является использование МИФС с утеплителем. Применение данного решения увеличивает энергоэффективность конструктивного узла на 24,4 %. При использовании только одного утеплителя энергоэффективность повышается на 10 %.

Проанализировано, насколько повышается энергоэффективность определенных слабых мест в отношении теплопроводности в том или ином конструктивном решении узлов теплозащитной оболочки здания, которая позволяет применить результаты для всего исследуемого здания.

Как отмечалось, слабые места в ограждающей конструкции здания составляют 53,1 %. Использование вентилируемого фасада и утеплителя в стыке плит повышает энергоэффективность, которая составляет 43,81 %, применение МИФС материалов — 29,95 %. Главным достоинством МИФС от вентилируемого фасада является его установка в любые, даже замкнутые, места для ликвидации теплопроводности уязвимых частей фасада, а также высокое эксплуатационное качество. Проектирова-



**Рис. 7.** Зависимость между температурой внутренней поверхности стены и результирующей температурой наружной поверхности стены для стыка балконной плиты и плиты перекрытия помещения: 1 — конструкция с мокрым фасадом; 2 — конструкция с утеплителем; 3 — конструкция с применением МИФС

**Fig. 7.** The relationship between the temperature of the inner surface of the wall and the resulting temperature of the outer surface of the wall for the junction of the balcony slab and the floor slab of the room: 1 — design with a wet facade; 2 — design with insulation; 3 — design using MIFS

ние вентилируемого фасада обуславливает проектировщика использовать его для всего здания в целом.

Для того чтобы помочь в выборе оптимальной энергоэффективной конструкции, в табл. 10 приведены достоинства и недостатки каждого исследуемого материала.

**Табл. 10.** Сравнительный анализ представленных методов повышения энергоэффективности ограждающих конструкций

**Table 10.** Comparative analysis of the presented methods for improving the energy efficiency of building envelopes

Наименование/Материалы Name/Materials	Вентилируемый фасад Ventilated facade	МИФС MIFS	Примечание Note
Процент повышения энергоэффективности для исследуемого здания Percentage of Energy Efficiency Improvement for the Study Building	43,81 %	29,95 %	При равных толщинах конструкций МИФС будет эффективнее на 15 % With equal thicknesses of structures MIFS will be 15 % more efficient
Легкость установки конструкций Ease of installation structures	Нет Not	Да Yes	Вентилируемый фасад необходимо применять ко всему зданию, а МИФС можно в определенные места A ventilated facade must be applied to the entire building, while MIFS can be applied to certain places
Теплофизические свойства Thermophysical properties	Высокие High	Высокие High	Рекомендуются Recommended

Наименование/Материалы Name/Materials	Вентилируемый фасад Ventilated facade	МИФС MIFS	Примечание Note
Толщина конструкций Structure thickness	Больше 20 мм More than 20 mm	Большой вариант толщин (толщина может составлять до 8 мм) Wide choice of thicknesses (thickness can be up to 8 mm)	При проектировании вентилируемого фасада необходимо задаться минимумом воздушного зазора в 20 мм When designing For a ventilated façade, a minimum air gap of 20 mm must be specified
Вариативность конструкций Design variability	Низкая Low	Высокая High	Вентилируемый фасад в основном представляет собой однотипные конструкции. Разновидность МИФС больше, есть возможность подбора под определенные задачи The ventilated facade is basically the same type of construction. The variety of MIFS is large, there is the possibility of selection for certain tasks
Возможность использования в разных температурных условиях (низкие температуры/высокие) Ability to use in different temperature conditions (low temperatures/high)	Да Yes	Да Yes	–
Визуализация энергоэффективной конструкции Visualization of an energy efficient design	Высокая (большая вариативность использования облицовочного материала) High (great variability in the use of facing material)	Низкая Low	При установке МИФС на лицевую сторону конструкции следует предусмотреть декоративные накладки When installing MIFS on the front side of the structure, it is necessary to provide decorative overlays
Защищенность от атмосферных осадков Weather protection	Средняя Medium	Высокая High	При установке вентиляруемого фасада с зазорами в конструкции необходимо предусмотреть гидроизоляционный слой. МИФС, установленный поверх теплоизоляционного слоя, защищает конструкцию от увлажнения When installing a ventilated facade with gaps, it is necessary to provide a waterproofing layer in the structure. MIFS, installed on top of the heat- insulating layer, protects the structure from moisture
Возможность применения на вертикальные конструкции Can be used on vertical structures	Да Yes	Да Yes	МИФС применяется во всех частях, где используется теплоизоляционный слой MIFS is used in all parts where a heat-insulating layer is used
Основная область применения конструкции The main scope of the design	Преимущественно для теплого климата Predominantly for warm climate	В любых климатических условиях In any climatic conditions	–

Окончание табл. 10 / End of the Table 10

Наименование/Материалы Name/Materials	Вентилируемый фасад Ventilated facade	МИФС MIFS	Примечание Note
Экономические затраты для проекта Economic cost for the project	Высокие High	Низкие Low	Сравниваются в денежном эквиваленте на зарубежных строительных рынках. Материал МИФС дешевый в производстве, вдобавок его еще можно использовать не для всего здания, а в определенных не энергоэффективных частях Here it is compared, in monetary terms, in foreign construction markets. By itself, the MIFS material is cheap to manufacture, in addition, it can still be used not for the entire building, but in certain non-energy efficient parts
Доступность на российском строительном рынке Availability in the Russian construction market	Высокие High	Низкие Low	Технологии МИФС слабо развиты в РФ, но есть возможность закупки у партнеров, ведется работа по производству в РФ MIFS technology is underdeveloped in the Russian Federation, but it is possible to purchase from partners, work is underway on production in the Russian Federation

Подытоживая результаты сравнительного анализа, отметим, что нет однозначного мнения в выборе определенной конструкции ограждения. Все зависит от ситуации, например количества экономических средств, необходимой толщины ограждающей конструкции, места установки, типа ограждающей конструкции и т.д. Приведенная таблица сравнения конструктивных решений, основанная на результатах исследований, может помочь проектировщику при разработке энергоэффективных теплозащитных конструктивных оболочек зданий.

Стоит уточнить, что для глобального российского строительного рынка существует ряд китайских компаний, которые способны поставлять МИФС. Одна из таких строительных компаний — China State Construction Engineering, эта государственная китайская компания активно сотрудничает с российским строительным рынком в области строительства и поставки материалов. Также есть вариант закупки и для частного российского строительного сегмента. Он состоит из возможности закупки МИФС на сторонних китайских маркетплейсах с дальнейшей доставкой в Россию. Ведется работа по организации совместного производства МИФС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В основе проведенных исследований заложен порядок теплотехнического расчета с применением МКЭ при помощи программного комплекса

в условиях тепловых воздействий на ограждающие конструкции, которые позволяют прогнозировать температурные сдвиги на поверхности внутри помещения.

Решены задачи в области определения угрозы внешних тепловых факторов на ограждающие конструкции и разработаны рекомендации для повышения их энергоэффективности. Выявлены с учетом зон уязвимости критические температуры на поверхности ограждающих конструкций снаружи помещения, при которых на поверхности внутри стены отмечаются неблагоприятные условия.

Проведен энергоаудит ограждающих конструкций в условиях нагружений тепловыми воздействиями, на основе которых разработаны рекомендации для повышения энергоэффективности ограждающих конструкций. Выполнен сравнительный анализ достоинств и недостатков исследуемых конструкций (представленный в виде таблицы) с выявлением их приемлемости при конструировании оболочки здания.

Определена роль угрозы внешних тепловых факторов в оценке энергоэффективности ограждающей конструкции.

Выявлена зависимость повышения энергоэффективности при применении двух методов борьбы с тепловыми нагрузками в условиях нестационарной теплопередачи. Установлено, что при применении метода вентилируемого фасада можно увели-

чить энергоэффективность здания на 43,81 %, а при использовании МИФС — на 29,95 %. Отмечено, что проектирование вентилируемого фасада касается всего здания в целом, а применение МИФС можно монтировать на более уязвимые места конструкций, что является энергоэффективнее для всей площади ограждающей конструкции на 15–25 %, чем первое конструктивное решение.

Выбор применения вентилируемого фасада или МИФС остается за проектировщиком. Если сравнивать материал с фазовым изменением и вентилируемый фасад, то первый энергоэффективнее

второго из-за того, что МИФС конструкция имеет малую толщину в сравнении с вентилируемым фасадом, технологичнее и надежнее в эксплуатации.

Предлагаемая методика моделирования и расчета с помощью ПК послужит для проведения энергоаудита качественной и количественной оценки термического состояния вертикальных ограждающих конструкций с учетом тепловых воздействий при нестационарных условиях теплопередачи и определения методов и средств повышения их энергоэффективности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров А.С., Курприянов В.Н. О влиянии компьютерной модели узлов конструкций с теплотехнической неоднородностью на точность теплотехнических расчетов // Приволжский научный журнал. 2019. № 1 (49). С. 32–38. EDN YAPSCU.

2. Митяев В.Д., Кобзева А.А. О теплозащитной оболочке зданий, острове тепла и потеплении // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Двадцать восьмой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. 2022. 521 с. EDN ZAERWC.

3. Романенко Е.Ю. Повышение энергетической эффективности ограждающих конструкций — путь повышения эффективности эксплуатации зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 255. EDN SBLMPH.

4. Колебировая Ю.С. Анализ процесса повышения энергоэффективности наружных ограждающих конструкций // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1. № 12 (29). С. 306–308. EDN YUKPHF.

5. Береговой А.М., Береговой В.А., Викторова О.Л. Регулирование процессов теплообмена и воздухообмена в ограждающих конструкциях и зданиях современного типа // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 1 (30). С. 69–73. EDN VZDKBH.

6. Охачочкин С.В., Казачёк Н.С. Экология и ресурсосбережение в строительстве // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2020. № 1. С. 515–518. EDN HBVNBS.

7. Гиясов А.И., Мирзоев С.М., Абдулрахман К. Моделирование тепло-ветровых процессов пристенного слоя ограждающих конструкций зданий при инсоляции // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 285–297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297

8. Васильева М.С., Терех М.Д. Энергомоделирование как современная основа повышения энергоэффективности зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. IV

Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 85–92. DOI: 10.23968/BIMAC.2021.010. EDN DXKRCU.

9. Гринфельд Г.И. Ограждающие конструкции из газобетонных блоков с облицовкой навесными фасадами // Строительные материалы. 2009. № 10. С. 75–76.

10. Lamrani B., Johannes K., Kuznik F. Phase change materials integrated into building walls: An updated review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 140. P. 110751. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110751

11. Бараненко А.В., Кузнецов П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ.

12. Dincer I., Rosen M. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. John Wiley & Sons, Chichester, 2002. 599 p.

13. Michael J.A. Experimental investigations of the combination of a heat pipe with metal foam or foils for enhancing heat transfer during the melting and solidification of a Phase Change Material (PCM) for latent heat thermal energy storage applications. Connecticut, University of Connecticut Graduate School, 2014. Pp. 1–196. URL: [http://digitalcommons.uconn.edu/gs\\_theses/570](http://digitalcommons.uconn.edu/gs_theses/570)

14. Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Камбаров М.А., Калибабекова Э.Н., Риставлетов Р.А. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве // Успехи современного естествознания. 2018. № 12–1. С. 9–13. DOI: 10.17513/use.36966

15. Suresh C., Hotta T.K., Saha S.K. Phase change material incorporation techniques in building envelopes for enhancing the building thermal Comfort-A review // Energy and Buildings. 2022. Vol. 268. P. 112225. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112225

16. Al-Yasiri Q., Szabó M. Selection of phase change material suitable for building heating applications based on qualitative decision matrix // *Energy Conversion and Management*: X. 2021. Vol. 12. P. 100150. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100150
17. Feng G., Wang T., He N., Wang G. A Review of Phase Change Materials // *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 356. P. 01062. DOI: 10.1051/e3s-conf/202235601062
18. Назиров Р.А., Тараненко Д.В., Веде П.Ю. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 2 (82). С. 90–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105. EDN AALHYT.
19. Sundararajan S., Samui A. Organic Phase Change Materials // *Smart Polymers*. 2022. Pp. 67–94. DOI: 10.1201/9781003037880-4
20. Imafidon O.J., Ting D.S.K. Energy consumption of a building with phase change material walls — The effect of phase change material properties // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 52. P. 105080. DOI: 10.1016/j.est.2022.105080

Поступила в редакцию 2 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Адхам Иминжанович Гиясов** — доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 57202817395; adham52@mail.ru;

**Егор Вадимович Карасёв** — магистр кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; karasev\_egor@rambler.ru.

*Вклад авторов:*

*Гиясов А.И. — научное руководство, руководство в формулировке математической модели и числового метода с помощью программного комплекса, концепция исследования, разработка методологии, написание итогового текста, итоговые выводы и заключение.*

*Карасёв Е.В. — составление математической модели и числового метода с помощью программного комплекса, разработка методологии исследования, обработка данных и составление графиков зависимостей, литературный обзор и написание текста, итоговые выводы и заключение.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

- Petrov A.S., Kupriyanov V.N. On the influence of a computer model of structures with thermotechnical heterogeneity on the accuracy of thermotechnical calculations. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2019; 1(49):32-38. EDN YAPSCU. (rus.).
- Mityaev V.D., Kobzeva A.A. On the heat-shielding shell of buildings, the island of heat and warming. *Radioelectronics, Electrical Engineering and Energy : abstracts of the Twenty-eighth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates*. 2022; 521. EDN ZAERWC. (rus.).
- Romanenko E.Y. Increase of power efficiency of protecting designs — a way of increase of efficiency of operation of buildings and constructions. *Engineering journal of Don*. 2013; 4(27):255. EDN SBLMPH. (rus.).
- Kolebirova Yu.S. Analysis of the process of increasing the energy efficiency of external building envelopes. *Modern Scientific Research and Development*. 2018; 1(12):306-308. EDN YYKPHF. (rus.).
- Beregovoy A.M., Beregovoy V.A., Viktorova O.L. Regulation of processes of heat and mass transfer and air exchange in enclosing structures and facades of modern type. *Regional Architecture and Engineering*. 2017; 1(30):69-73. EDN VZDKBH. (rus.).
- Okhapochkin S.V., Kazachek N.S. Ecology and resource saving in construction. *Development of Young Scientists — National Technology Initiative (POISK)*. 2020; 1:515-518. EDN HBVNBS. (rus.).
- Giyazov A.I., Mirzoev S.M., Abdulrahman K. Modeling thermal and wind processes in the near-wall layer of building envelopes subjected to insolation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(3):285-297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297 (rus.).
- Vasileva M.S., Terekh M.D. Energy modeling as a modern method of improving the energy efficiency of buildings. *BIM-modeling in the prospects of construction and architecture : proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*.

2021; 85-92. DOI: 10.23968/BIMAC.2021.010. EDN DXKRCD. (rus.).

9. Grinfeld G.I. Enclosing structures made of aerated concrete blocks with hinged facades. *Building Materials*. 2009; 10:75-76. (rus.).

10. Lamrani B., Johannes K., Kuznik F. Phase change materials integrated into building walls: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021; 140:110751. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110751

11. Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018; 18(6):990-1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ. (rus.).

12. Dincer I., Rosen M. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, 2002; 599.

13. Michael J.A. *Experimental investigations of the combination of a heat pipe with metal foam or foils for enhancing heat transfer during the melting and solidification of a Phase Change Material (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage Applications*. Connecticut, University of Connecticut Graduate School, 2014; 1-196. URL: [http://digitalcommons.uconn.edu/gs\\_theses/570](http://digitalcommons.uconn.edu/gs_theses/570)

14. Aymbetova I.O., Suleymenov U.S., Kambarov M.A., Kalshabekova E.N., Ristavletov R.A. Ther-

mophysical properties of phase transparent heat-storing materials used in construction. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018; 12-1:9-13. DOI: 10.17513/use.36966 (rus.).

15. Suresh C., Hotta T.K., Saha S.K. Phase change material incorporation techniques in building envelopes for enhancing the building thermal Comfort-A review. *Energy and Buildings*. 2022; 268:112225. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112225

16. Al-Yasiri Q., Szabó M. Selection of phase change material suitable for building heating applications based on qualitative decision matrix. *Energy Conversion and Management: X*. 2021; 12:100150. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100150

17. Feng G., Wang T., He N., Wang G. A review of phase change materials. *E3S Web of Conferences*. 2022; 356:01062. DOI: 10.1051/e3sconf/202235601062

18. Nazirov R.A., Taranenko D.V., Vede P.Yu. The use of materials with a changing phase state in building envelope structures. *Building and Reconstruction*. 2019; 2(82):90-105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105. EDN AALHYT. (rus.).

19. Sundararajan S., Samui A. Organic phase change materials. *Smart Polymers*. 2022; 67-94. DOI: 10.1201/9781003037880-4

20. Imafidon O.J., Ting D.S.K. Energy consumption of a building with phase change material walls — The effect of phase change material properties. *Journal of Energy Storage*. 2022; 52:105080. DOI: 10.1016/j.est.2022.105080

Received February 2, 2023.

Adopted in revised form on April 24, 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES:** **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 57202817395; adham52@mail.ru;

**Egor V. Karasev** — magister of the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; karasev\_egor@rambler.ru.

*Contributions of the authors:*

*Adham I. Giyazov — scientific guidance, guidance in the formulation of a mathematical model and a numerical method using a software package, the concept of research, development of methodology, writing the final version of the text, final conclusions and conclusions.*

*Egor V. Karasev — compilation of a mathematical model and a numerical method using a software package, development of a research methodology, data processing and plotting of dependencies, literature review and writing a text revision, final conclusions and conclusion.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Актуальные направления развития отечественной нормативно-технической документации в области строительства из древесины с учетом зарубежного опыта

Сергей Александрович Агафонов<sup>1</sup>, Владимир Алексеевич Волкодав<sup>2</sup>,  
Иван Алексеевич Волкодав<sup>2</sup>, Ирина Дмитриевна Титова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС);  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Сосредоточение на территории Российской Федерации огромного объема лесных ресурсов позволяет значительно расширить применение древесины в строительстве как малоэтажных, так и многоэтажных зданий и сооружений. Представлены основные направления развития нормативно-технической документации (НТД) в области деревянного строительства, востребованные профессиональным сообществом.

**Материалы и методы.** Проведен опрос участников рынка деревянного домостроения для выявления наиболее актуальных проблем в области применения древесины в строительной индустрии. Рассмотрена НТД США, Канады и стран ЕС, регламентирующая применение древесины в области строительного производства. Выявлены лучшие практики, реализованные в зарубежной НТД и способные служить ориентиром в процессе модернизации отечественной нормативной базы в исследуемой предметной области. Рассмотрены вопросы пожарной безопасности, сейсмостойкости, а также современные строительные материалы и изделия на основе древесины, используемые на рынке строительных деревянных конструкций (ДК). Произведен анализ состава и структуры НТД РФ в области строительства из древесины.

**Результаты.** Анализ отечественной и зарубежной НТД выявил значительный дефицит в части нормативно-методического обеспечения строительства из материалов и изделий на основе древесины. Выработаны рекомендации по актуализации, отмене или доработке отечественных нормативно-технических документов.

**Выводы.** Сформулирована и обоснована необходимость интенсификации прикладных научных исследований для актуализации НТД, в частности нормативно-методических пособий и рекомендаций. Разработаны предложения по структурированию системы НТД РФ в области строительных ДК. Система государственных стандартов в рассматриваемой области должна охватывать технические условия на отдельные материалы и изделия из древесины, описывающие их физико-механические свойства и расчетные характеристики. Предлагаемая структура НТД в области деревянного строительства имеет возможность динамичного развития с учетом развития номенклатуры материалов, расчетных методик и прикладных технологий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительство из древесины, деревянное строительство, ДПК (CLT), балки на МЗК, КТП (SIP), сейсмические воздействия, пожарная безопасность, нормативно-техническая документация, стандартизация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Агафонов С.А., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Титова И.Д. Актуальные направления развития отечественной нормативно-технической документации в области строительства из древесины с учетом зарубежного опыта // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1055–1077. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1055-1077

Автор, ответственный за переписку: Иван Алексеевич Волкодав, via@niccps.ru.

## Current directions of development of domestic regulatory and technical documentation in the field of timber construction considering foreign experience

Sergei A. Agafonov<sup>1</sup>, Vladimir A. Volkodav<sup>2</sup>, Ivan A. Volkodav<sup>2</sup>, Irina D. Titova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction;  
St. Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The concentration of a huge amount of forest resources on the territory of the Russian Federation allows to expand significantly the usage of wood in the construction of both low-rise and high-rise buildings and structures. The main

directions of development of normative and technical documentation (NTD) in the field of wooden construction, demanded by the professional community, are presented.

**Materials and methods.** A survey of wooden house building market participants was conducted to identify the most urgent problems in the field of wood application in the construction industry. The NTD of the USA, Canada and EU countries regulating the usage of wood in the construction industry were reviewed. The best practices implemented in foreign NTD and capable of serving as a reference point in the process of modernization of the domestic regulatory framework in the subject area under study have been identified. The questions of fire safety, earthquake resistance, as well as modern construction materials and products based on wood, used in the market of building wooden structures (WS) are considered. The composition and structure of NTD of the Russian Federation in the field of wood construction have been analyzed.

**Results.** The analysis of domestic and foreign NTD has revealed a significant deficit in the part of normative and methodological support of construction from materials and products based on wood. Recommendations on updating, cancellation or revision of domestic normative-technical documents have been developed.

**Conclusions.** The necessity of intensification of applied scientific researches for updating of NTD, in particular normative-methodical manuals and recommendations is formulated and substantiated. Proposals for structuring the system of NTD RF in the field of construction of wooden structures have been developed. The system of state standards in this area should cover technical specifications for individual materials and wood products describing their physical and mechanical properties and design characteristics. The proposed structure of NTD in the field of wooden construction has the possibility of dynamic development taking into account the development of the nomenclature of materials, calculation methods and applied technologies.

**KEYWORDS:** wooden construction, CLT, POSI-beams, SIP, seismic impacts, fire safety, normative-technical documentation, standardization

**FOR CITATION:** Agafonov S.A., Volkodav V.A., Volkodav I.A., Titova I.D. Current directions of development of domestic regulatory and technical documentation in the field of timber construction considering foreign experience. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1055-1077. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1055-1077 (rus.).

*Corresponding author:* Ivan A. Volkodav, via@niccps.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Рост применения деревянных конструкций (ДК) в строительной индустрии РФ, обусловленный в том числе наличием значительного и возобновляемого объема лесных ресурсов на территории нашей страны, требует последовательного обновления и актуализации нормативной базы, регламентирующей использование древесины в строительстве, с учетом появления новых строительных материалов, технологий и методов проектирования. В рамках реализации государственной программы «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации»<sup>1</sup> развитие технологий деревянного домостроения — одна из наиболее перспективных и соответствующих основным заявленным приоритетным направлениям задач.

В настоящее время среди ключевых факторов, сдерживающих развитие деревянного строительства в России, отмечается недостаточное обеспечение строительной отрасли необходимой нормативно-технической документацией (НТД). Все более широкое распространение получает строительство многоэтажных зданий из древесины и материалов на ее основе [1–3], такая тенденция ярко выражена в мире и тесно связана с развитием направления устойчивого проектирования (sustainable engineering) [4–6]. В России из древесины строятся здания малой этажности вследствие традиционных

ограничений, закрепленных в действующих нормативных документах.

Как отмечено в работе [7], прогресс в области использования различных технологий и совершенствование методик расчета строительных элементов и конструкций из древесины обуславливают необходимость коренного пересмотра строительных норм, подобного пересмотру 1930–1955-х гг.

Накопленный сегодня отечественный и мировой опыт строительства большепролетных и многоэтажных зданий из древесины с учетом более глубокого изучения свойств материалов, характера их взаимодействия в композитных строительных конструкциях и элементах; возможности применения современных проектно-вычислительных комплексов для расчета параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных систем как в целом, так и отдельных их элементов; использование современных технологий формирования, в том числе равнопрочных узлов соединения элементов ДК, позволяет реализовывать проекты любой степени сложности. Кроме того, существующие разработки в области оптимизации конструкций на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения дают возможность значительно повысить эффективность применения древесины в строительстве.

Среди наиболее популярных и перспективных строительных материалов и изделий на основе древесины сегодня выделяется древесина перекрестно-клееная (ДПК) (Cross-Laminated Timber — CLT) [8, 9], которую часто сопоставляют с другими видами строительных материалов [10] по техническим характеристикам и влиянию на окружающую среду. Строитель-

<sup>1</sup> Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации»: Постановление Правительства РФ от 30.12.2017 № 1710.

ство зданий из ДПК (CLT) — это высокоэффективное решение, в том числе с точки зрения скорости возведения, восприятия действующих нагрузок, пожарной безопасности, а следовательно, и возможности увеличения этажности застройки [11–14]. В мире уже реализовано или находится на стадии разработки большое количество проектов многоэтажных зданий различного назначения с применением строительных конструкций на основе древесины [15]. В таких зданиях применены разные конструктивные системы — каркасная, стеновая, модульная и комбинированная (включающая элементы балочно-стоечного каркаса и несущих стен), во многих случаях все элементы таких систем выполнены из древесины и ее производных, включая лестнично-лифтовые узлы, выступающие в качестве ядер жесткости.

Большинство действующих сегодня НТД, регламентирующих проектирование и строительство зданий из древесины, например СП 352.1325800.2017 «Здания жилые многоквартирные с деревянным каркасом. Правила проектирования и строительства»<sup>2</sup>, рассматривает здания из древесины ограниченной высотности (не более трех этажей).

В ответ на запрос строительной отрасли в 2020 г. были введены два НТД, регулирующих применение ДК: СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования»<sup>3</sup> и СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования»<sup>4</sup>. Указанные документы допускают строительство зданий из древесины высотой до 28 м, однако ограничения, связанные с требованиями пожарной безопасности, в частности к площадям пожарных отсеков, этажности зданий, уменьшают экономическую эффективность такого типа строительства и замедляют развитие рассматриваемого направления строительной индустрии в РФ.

В настоящей статье рассмотрена документация, регулирующая рассматриваемую предметную область в странах ЕС, США и Канаде ввиду наличия на соответствующих рынках значительного опыта успешной реализации проектов строительства зданий и сооружений различной степени сложности с применением ДК. Международное сотрудничество, обмен компетенциями, коммерческие связи формируют необходимость гармонизации подходов к составлению норм проектирования для повыше-

<sup>2</sup> СП 352.1325800.2017. Здания жилые многоквартирные с деревянным каркасом. Правила проектирования и строительства. М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>3</sup> СП 451.1325800.2019. Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2020.

<sup>4</sup> СП 452.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2020.

ния взаимопонимания специалистов разных стран с целью обеспечения надежности и эффективности сооружений, возводимых в различных природно-климатических условиях. Анализ зарубежной документации направлен на адаптацию лучших практик нормативно-технического регулирования для отечественного рынка деревянного строительства.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представлен обзор существующих проблем в нормативно-техническом регулировании деревянного домостроения в Российской Федерации и предложены возможные направления их решения с учетом зарубежного опыта. При подготовке статьи использованы материалы, разработанные компанией ООО «НИЦ ЦПС» в рамках реализации научно-исследовательской работы<sup>5</sup> в 2022 г.

Рынок конструкций из древесины в РФ характеризуется направленностью на малоэтажную застройку, нехваткой кадров в части инженерно-технического обеспечения строительства, большим количеством мелких участников рынка, отсутствием современных отечественных расчетно-вычислительных комплексов для решения сложных инженерных задач в области проектирования ДК, а также проблемами в сфере логистики в части доставки ДК с производств на строительные площадки.

Вопрос подготовки квалифицированных специалистов, способных в достаточной мере использовать актуальные методики расчета и проектирования ДК, применять современные, зачастую зарубежные, непрерывно совершенствуемые проектно-вычислительные комплексы, обозначенный в том числе в труде [7], актуален и сегодня.

Имеющиеся отечественные программные комплексы, реализующие возможности по определению параметров НДС элементов строительных конструкций из древесины, разрабатываемые на принципах общности подходов к расчету таких параметров для всего спектра строительных материалов, не всегда учитывают специфику древесины как строительного материала и часто не успевают за развитием технологий, применяемых в строительстве.

Из-за большого количества относительно мелких разрозненных участников рынка разработка и внедрение общей НТД значительно затруднена. Для решения указанной проблемы участники рынка объединяются в ассоциации в сфере деревянного строительства, примерами таких объединений могут служить Ассоциация деревянного домостро-

<sup>5</sup> Отчет о научно-исследовательской работе выполнения работ по мониторингу и анализу действующих и разрабатываемых нормативных документов стран ЕС и Северной Америки по деревянным конструкциям и зданиям из деревянных конструкций : отчет о НИР; СПб. : ООО «НИЦ ЦПС», 2022. 227 с.

ения, Ассоциация деревянного домостроения Вологодской области, Ассоциация домостроительных технологий СИП. Помимо этого, крупные деревообрабатывающие производства также внедряют стандарты организаций для изготовления и использования своей продукции. Например, ООО «Сокол СиЭлТи» (Сегежа Групп) совместно с АО «НИЦ «Строительство»» был разработан стандарт организации СТО 16.23.1-001-6202182–2022 «Конструкции из древесины перекрестно-клееной. Общие технические требования»<sup>6</sup>, регулирующий применение производимых соответствующим предприятием строительных изделий ДПК (CLT) и содержащий основную техническую информацию о характеристиках и правилах использования такого типа изделий в строительстве, а также методах транспортировки, монтажа, хранения и эксплуатации. Однако недостаточно развитая нормативно-техническая база и излишние ограничения в части пожарной безопасности не позволяют экономически эффективно реализовать потенциал предприятий для применения в строительстве ДК высокой степени заводской готовности.

По результатам анализа исследований предыдущих лет выявлено, что большая часть НТД в области строительства, рассмотренной в мониторингах 2015–2018 гг., не актуализирована по состоянию на 2022 г., а предложения к разработке новых СП не были учтены в полном объеме, лишь часть из них реализована в рамках актуализации пунктов СП 64.13330.2017<sup>7</sup>.

Отмеченные в настоящей статье проблемы нормативно-технического и методического регулирования усугубляются противоречивостью обязательности и добровольности применения НТД в проектной и производственной практике строительства, обозначенной в работе [16]. В частности: разделение норм на обязательные и добровольные, статус стандартов на методы испытаний строительных материалов, неопределенный статус большей части нормативных документов, выделение из обязательных документов частей добровольного применения, а также несовершенство процедуры рассмотрения и принятия конкретных нормативно-технических документов.

Авторами статьи поставлена задача придать проводимым исследованиям максимально прикладной характер — выявить и осветить проблемы, существующие в области массового применения конструкций и элементов на основе древесины в строительстве с целью выработки оптимальных путей их решения. Для определения таких «боле-

точек» в рамках мониторинга отечественного рынка строительства из древесины проведен опрос участников рынка деревянного домостроения. В опросе приняли участие 46 респондентов, представляющих 37 организаций и индивидуальных предпринимателей, реализующих свою деятельность в области деревянного домостроения и смежных областях, в том числе производственные и строительные предприятия «Русь», «Виллози Хаус», «Избург», «Велесадом», «Сокол СиЭлТи», «Нодверк», а также представители вузов, ведущих подготовку инженерных кадров для строительной отрасли, — Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета.

На рис. 1 представлены результаты распределения участников опроса по функциональным обязанностям в профессиональной деятельности.

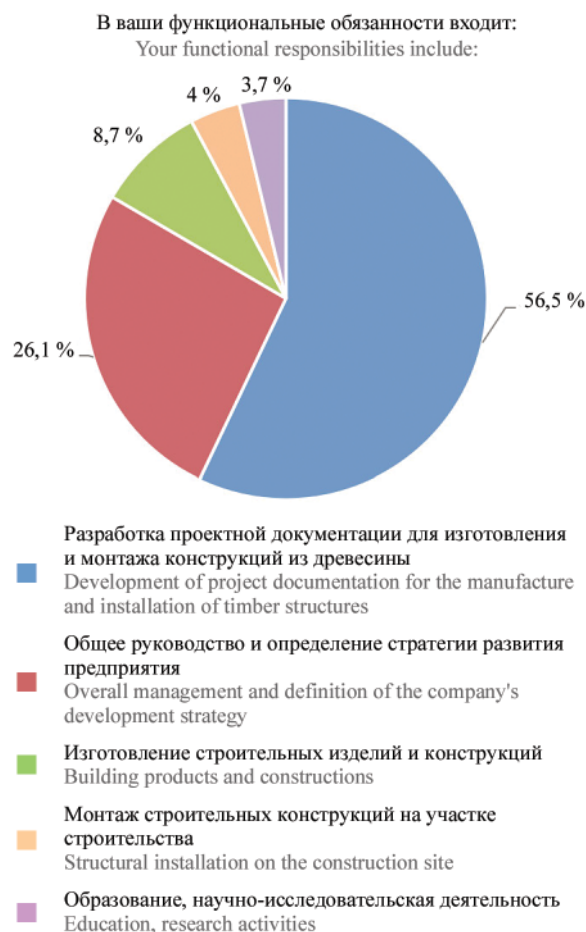


Рис. 1. Распределение респондентов по функциональным обязанностям, реализуемым в рамках профессиональной деятельности

Fig. 1. Distribution of respondents by functional responsibilities implemented in the framework of professional activity

<sup>6</sup> СТО 16.23.1-001-6202182–2022. Конструкции из древесины перекрестно-клееной. Общие технические требования.

<sup>7</sup> СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80 (с Изменениями № 1–3). М.: Стандартинформ, 2017.

Необходимо отметить, что основой фокус-группы стали разработчики проектной документации для строительства из древесины — специалисты, непосредственно сталкивающиеся с использованием НТД, регламентирующей проектирование ДК, и знакомые с наиболее актуальными проблемами в рассматриваемой предметной области.

Респондентами обозначены следующие ключевые проблемы в части нормативно-технического регулирования РФ применения древесины и материалов на ее основе в строительстве:

- недостаток технической информации и расчетных характеристик современных изделий и материалов;
- недостаточное освещение работы большепролетных и гнукклееных деревянных элементов;
- работа стальных соединительных элементов в конструкциях из древесины;
- нехватка методических пособий, учебной литературы и нормативно-методической документации в области строительства из древесины.

Среди проблем, замедляющих развитие деревянного домостроения, указаны:

- дефицит общепринятой номенклатуры изделий из древесины с едиными техническими характеристиками;
- отсутствие единой и удобной системы классификации дефектов, описания их влияния на несущую способность и качественных методик по их устранению;
- отсутствие технологических монтажных карт, а также норм для определения трудоемкости строительства;
- низкое качество нормативной документации, которая содержит «ошибки, опечатки и противоречия», формальный подход при разработке нормативных документов;
- несбалансированность и переизбыток требований нормативной документации к пожарной безопасности ДК, замедляющих развитие многоэтажного деревянного строительства.

На рис. 2 показано распределение ответов участников опроса в части приоритетного рассмотрения зарубежной нормативно-технической базы. При выборе региона мира для заимствования опыта в части нормативно-технического регулирования деревянного строительства большая часть респондентов (56,5 %) отметила страны Скандинавии. По мнению авторов, полученное распределение ответов продиктовано схожестью климатических условий для строительства, территориальной близостью, а также экономическими и технологическими связями участников рынка. Страны Северной Америки были отмечены в основном участниками рынка, работающими с конструкционными теплоизоляционными панелями (КТП) (Structural Insulated Panel — SIP).

Среди предложенных направлений модернизации отечественной нормативно-технической базы

Нормативно-техническую документацию каких зарубежных стран вы считаете наиболее актуальной для частичного внедрения на территории РФ?  
Which foreign regulations do you consider most relevant for partial implementation in Russia?

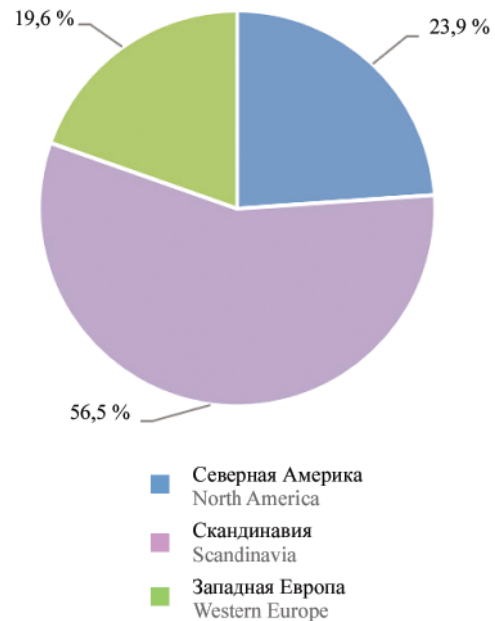


Рис. 2. Регионы мира с наиболее актуальным состоянием нормативно-технической документации в области деревянного домостроения (по мнению участников опроса)

Fig. 2. Regions of the world with the most up-to-date state of regulatory and technical documentation in the field of wooden house construction (according to the survey participants)

для ускорения развития строительства с применением ДК наиболее актуальными отмечены области, представленные в табл. 1.

Самым актуальным направлением участниками опроса названо расширение базы нормативно-методической документации, содержащей рекомендации по применению современных строительных материалов и изделий. Многие из таких строительных изделий сегодня применяются участниками рынка на свой страх и риск без соответствующего нормативного сопровождения. Такой подход к использованию материалов в совокупности с дефицитом инженерно-технических кадров в отдельных случаях приводит к дискредитации древесины как строительного материала на отечественном рынке.

Больше половины опрошенных заинтересованы в изменениях требований пожарной безопасности, предъявляемых к ДК. Существующие ограничения, по мнению участников опроса и авторов статьи, во многом избыточны и замедляют развитие деревянного строительства на территории РФ, особенно в случаях строительства объектов, не связанных с индивидуальным жилищным строительством.

Табл. 1. Основные направления модернизации отечественной нормативно-технической документации

Table 1. The main directions of modernization of domestic regulatory and technical documentation

Направление модернизации отечественной нормативной базы The direction of the modernization of the domestic regulatory framework	Доля ответов, % Response rate, %
Расширение базы документов нормативно-методического характера (пособия, рекомендации и т.д.) по проектированию и расчету отдельных видов изделий и конструкций из древесины Expanding the database of normative and methodological documents (manuals, recommendations, etc.) for the design and calculation of individual types of wood products and structures	80,4
Расширение базы применяемых строительных изделий и материалов на основе древесины Expanding the base of applied wood-based construction products and materials	73,9
Требования к пожарной безопасности конструкций из древесины Fire safety requirements for timber structures	63,0
Требования к потребительским свойствам элементов и изделий из древесины, не влияющих на несущую способность зданий и сооружений Requirements for the application properties of timber elements and products that don't affect the load-bearing capacity of buildings and structures	30,4
Требования к конструкциям, возводимым в условиях сейсмичности Requirements for structures to be erected in seismic environments	19,6

Основными нормативно-техническими документами, требующими переработки для ускорения развития в нашей стране строительства зданий и сооружений с применением ДК, по результатам опроса являются СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» (73,3 %) и СП 70.13330 «Несущие и ограждающие конструкции»<sup>8</sup> (42,2 %). Также респондентами была предложена актуализация СП 352.1325800.2017 «Здания жилые многоквартирные с деревянным каркасом» и СП 31-105–2002 «Проектирование и строительство энергоэффективных одноквартирных жилых домов с деревянным каркасом»<sup>9</sup> и разработка НТД для строительства

зданий с применением КТП (SIP). Стоит уточнить, что СП 352.1325800.2017 фактически является переработанной редакцией ранее выпущенного СП 31-105–2002. Такая тенденция, по мнению авторов настоящей статьи, свидетельствует о потребности профессионального сообщества в актуализации и дополнении рекомендаций по применению строительных изделий и элементов из древесины при строительстве зданий и сооружений с учетом сложившейся на сегодня номенклатуры производимых строительных изделий.

В табл. 2 представлено процентное соотношение ответов участников рынка о наиболее востребованных и актуальных направлениях разработки нормативно-методической документации.

Полученные данные свидетельствуют о существующем дефиците НТД по всем предложенным направлениям. Необходимо отметить, что все перечисленные строительные элементы и изделия сегодня достаточно активно используются на рынке

<sup>8</sup> СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01–87 (с Изменениями № 1, 3, 4). М. : Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2013.

<sup>9</sup> СП 31-105–2002. Проектирование и строительство энергоэффективных одноквартирных жилых домов с деревянным каркасом. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2002.

Табл. 2. Приоритетные направления разработки нормативно-методической документации

Table 2. Priority directions for the development of regulatory and methodological documentation

Направление разработки нормативно-методической документации Direction for the development of normative and methodological documentation	Доля ответов, % Response rate, %
Системы соединения элементов из древесины и других материалов в конструкциях зданий и сооружений Systems for connecting wood and other materials in building structures	65,2
Композитные элементы из древесины — двутавровые балки (I-балки), балки на металлических зубчатых кронштейнах (POSI-балки), фермы на металлических зубчатых пластинах (МЗП) и т.д. Composite timber elements — I-beams, beams on metal toothed brackets (POSI-beams), trusses on metal toothed plates (MZP), etc.	54,3
Древесина перекрестноклееная (CLT) / Cross-laminated timber (CLT)	45,7
Композитные конструкции — конструктивные теплоизоляционные панели (SIP-панели) и т.д. Composite structures — structural insulating panels (SIP panels), etc.	21,7

строительства малоэтажных индивидуальных жилых домов и хозяйственных построек, однако, как упоминалось ранее, принятие обоснованных и эффективных решений по их применению значительно затруднено.

Базовым нормативным документом в части требований, предъявляемых к ДК на территории России, является СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Кроме того, действуют нормативные документы, уточняющие требования и рекомендации к применяемым в строительстве ДК, в зависимости от категории объекта, среди них:

- СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»<sup>10</sup>;
- СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции»;
- СП 299.1325800.2017 «Конструкции деревянные с узлами на винтах. Правила проектирования»<sup>11</sup>;
- СП 352.1325800.2017 «Здания жилые многоквартирные с деревянным каркасом»;
- СП 382.1325800.2017 «Конструкции деревянные клееные на клеенных стержнях. Методы расчета»<sup>12</sup>;
- СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования»;
- СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования»;
- СП 515.1325800.2022 «Здания из клееного деревянного бруса. Правила проектирования и строительства»<sup>13</sup>;
- СП 516.1325800.2022 «Здания из деревянных срубных конструкций. Правила проектирования и строительства»<sup>14</sup>.

Актуальной является задача по разработке нормативно-методической документации нижнего уровня (пособий и рекомендаций) с детализацией требований, предъявляемых к отдельным видам применяемых изделий и материалов на основе древесины. Значительный дефицит таких документов снижает качество принимаемых проектных решений.

<sup>10</sup> СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\* (с Изменениями № 1–3). М. : ОАО «ЦПП», 2011.

<sup>11</sup> СП 299.1325800.2017. Конструкции деревянные с узлами на винтах. Правила проектирования (с Изменением № 1). М. : Стандартинформ, 2017.

<sup>12</sup> СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клееные на клеенных стержнях. Методы расчета (с Изменением № 1). М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>13</sup> СП 515.1325800.2022. Здания из клееного деревянного бруса. Правила проектирования и строительства. М. : ФГБУ «РСТ», 2022.

<sup>14</sup> СП 516.1325800.2022. Здания из деревянных срубных конструкций. Правила проектирования и строительства. М. : ФГБУ «РСТ», 2022.

Возведение новых типов зданий и сооружений с применением ДК связано с необходимостью нормативно-технического и методического регулирования и сопровождения решений, принимаемых при реализации в конкретных проектах, и требований, предъявляемых к надежности и долговечности ДК, эксплуатируемых в условиях сейсмичности. В отечественной НТД, регламентирующей строительство сейсмостойких зданий и сооружений, зафиксированы главным образом ограничения, налагаемые на применение ДК.

Помимо основного документа, регулирующего применение ДК в строительстве, — СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции», строительство в условиях сейсмичности регламентируется следующими нормативными документами:

- СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»<sup>15</sup>;
- СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»<sup>16</sup>.

Кроме сводов правил для детализации и уточнения требований документов верхнего уровня в некоторых регионах РФ применяются территориальные строительные нормы (например, ТСН 22-302–2000\*<sup>17</sup> и БурТСН-4–02<sup>18</sup>).

СП 20.13330.2016 относит сейсмические нагрузки к особым и определяет порядок их включения в рассматриваемые сочетания при расчете и проектировании в соответствии с СП 64.13330.2017. В свою очередь, СП 64.13330.2017 устанавливает необходимость учета требований СП 14.13330.2018 при проектировании конструкций из древесины в условиях сейсмичности, определяет расчетные характеристики материала и содержит общие указания по проектированию таких конструкций. В частности, о необходимости преимущественного использования статически определимых конструктивных схем, обеспечении возможности поворота в шарнирных узлах и предотвращении скалывания древесины.

Кроме общих рекомендаций по применению деревянных конструкций в части необходимости

<sup>15</sup> СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7–81\* (с Изменениями № 2, 3). М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>16</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\* (с Изменениями № 1–4). Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.

<sup>17</sup> ТСН 22-302–2000\* Краснодарского края (СНKK 22-301–2000\*). Строительство в сейсмических районах Краснодарского края. Департамент строительства Краснодарского края, 2004.

<sup>18</sup> БурТСН-4–02. Указания по антисейсмическим мероприятиям в деревянных конструкциях и зданиях, возводимых в Республике Бурятия. Улан-Удэ : Минстройжилкомхоз Республики Бурятия, 2002.

обеспечения пространственной жесткости конструкций и повышения надежности соединений элементов, СП 14.13330.2018 содержит избыточные, по мнению авторов, ограничения, затрудняющие применение современных конструктивных решений деревянных зданий и сооружений. К таким ограничениям относятся:

- ограничение высоты и этажности деревянных зданий высотой восемь метров и двумя этажами при сейсмичности 7 и 8 баллов, и четыре метра и одним этажом при сейсмичности 9 баллов (п. 6.1.5);
- необходимость усиления перекрытия слоем монолитного железобетона (п. 6.3.5);
- ограничение перекрываемого деревянным перекрытием (покрытием) пролета шестью метрами в условиях сейсмичности 7 и 8 баллов (п. 6.3.6);
- рекомендуемый шаг стоек каркаса не более трех метров (п. 6.15.3).

Перечисленные требования носят избыточный характер, не учитывающий современный уровень развития строительной науки в области применения деревянных конструкций при возведении зданий. Ограничительный характер требований, предъявляемых к рассматриваемому типу конструкций, подчеркивался и более ранними исследованиями, однако выработанные предложения так и не были реализованы в НТД РФ.

Следует отметить значительную ориентированность рекомендаций, содержащихся в СП 14.13330.2018 в части строительства из древесины, на срубные конструкции. В настоящее время такой тип конструктивных решений утрачивает популярность на строительном рынке, уступая место технологиям с применением композитных элементов и большепролетных конструкций, рекомендации к которым в документе отсутствуют.

Таким образом, отечественная нормативно-техническая база, регламентирующая проектирование и строительство объектов капитального строительства (ОКС) с применением ДК, требует доработки с учетом современных тенденций развития строительного рынка в части применения ДК в средне- и многоэтажном строительстве.

Рассматривая опыт зарубежных стран по созданию нормативной документации, регламентирующей деревянное строительство в сейсмических районах, целесообразным видится анализ норм, действующих в странах ЕС и Северной Америки. В странах ЕС проектирование, изготовление, монтаж и оценка технического состояния строительных конструкций осуществляется в соответствии с требованиями европейских стандартов (EN). Основные правила проектирования представлены в рамках системы Еврокодов.

Основными документами являются EN 1995 «Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций»<sup>19</sup> и EN 1998 «Еврокод 8. Проектирование сейсмостойких конструкций»<sup>20</sup>. Система Еврокодов реализует принципы общего подхода к сотрудничеству на рынке Европы, в частности в области строительной продукции, которая предусматривает локализацию отдельных положений странами-участниками ЕС посредством национальных документов по применению Еврокодов.

Строительные нормы и принципы по проектированию ДК приведены в стандарте EN 1995 «Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций».

Документ содержит требования к обеспечению несущей способности, эксплуатационной пригодности, огнестойкости и долговечности конструкций из древесины при использовании совместно с EN 1990 «Еврокод. Основы проектирования конструкций», EN 1991 «Еврокод 1: Воздействие на конструкции»<sup>21</sup> и EN 1998 «Еврокод 8. Проектирование сейсмостойких конструкций» (при необходимости в зависимости от условий строительства).

Последний документ содержит требования и рекомендации к проектированию и строительству зданий и сооружений в сейсмических районах для обеспечения высокой вероятности сохранения жизни людей и работоспособности конструкций, а также минимизации материального ущерба при землетрясениях.

Правила, реализация которых обеспечивает надежность работы ДК, возводимых в условиях сейсмичности, приведены в разделе 8 EN 1998 «Особые правила для деревянных сооружений». В разделе указаны применимые концепции проектирования ДК — рассеивающее и слабо рассеивающее структурное поведение, которое используется в зависимости от структурного класса пластичности проектируемой конструкции. Значительное внимание уделено работе механических связей в соединениях элементов ДК. Также представлены требования к свойствам применяемых материалов. Крайне важным аспектом является отсутствие прямых ограничений в выборе объемно-планировочных и конструктивных решений, что позволяет проектировщику принимать и защищать обоснованные решения.

<sup>19</sup> EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.1.2004.pdf>

<sup>20</sup> EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>

<sup>21</sup> EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.1.2002.pdf>

Нормативная база США в области деревянного строительства включает в основном национальные нормы по проектированию конструкций (National Design Specification — NDS) и стандарты американского сообщества по испытанию материалов (American Society for Testing and Materials — ASTM). Для проектирования конструкций из древесины и материалов на ее основе используются National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2018<sup>22</sup>, разработанные Американским советом по древесине (American Wood Council).

В нормотворчестве США большую роль играют ассоциации и объединения строителей, проектировщиков и производителей строительных материалов, изделий и конструкций. Такие объединения имеют возможность разрабатывать стандарты, которые не только стимулируют спрос на их продукцию, но и позволяют уточнять и расширять действующую нормативно-техническую базу. Стандарты такого типа могут обладать статусом национальных стандартов и нормативно-методических рекомендаций.

При проектировании конструкций зданий из древесины в условиях сейсмичности национальные правила по проектированию ДК применяются совместно со специальными проектными положениями ANSI/AWC SDPWS–2021<sup>23</sup>, содержащими требования и рекомендации по проектированию конструкций, их элементов и соединений для восприятия ветровых и сейсмических нагрузок. Расчет проектируемых конструкций возможен по одному из двух методов: по допустимому расчетному напряжению (ASD) или методу частных коэффициентов для нагрузок и сопротивлений (LRFD). В текущей редакции частично уточнены требования к несущей способности и деформативности элементов ДК и внесены дополнения по работе с конструкциями из ДПК (CLT).

Разработчиками последней редакции рассматриваемого документа проделана значительная работа по анализу изделий и материалов из древесины для получения эквивалентных значений расчетных характеристик конструкций. Многие значения прочностных характеристик строительных элементов, работающих под действием сейсмических нагрузок, синхронизированы с аналогичными характеристиками конструкций, работающих под воздействием ветра. Такая гармонизация позволяет упростить разработку проектной документации, при этом сделать работу конструкций более надежной и прогнозируемой. Норматив содержит рекомендации по проектированию дисков и диафрагм

жесткости из ДПК (CLT), хорошо воспринимающих динамические воздействия. Также в документе представлено большое количество расчетных характеристик и описаний отдельных конструктивных систем для обеспечения эффективности принимаемых решений при безусловном обеспечении надежности возводимых конструкций. Кроме того, уточнены требования и рекомендации по применению механических связей для соединений элементов обшивок в конструкциях, работающих под воздействием ветровых и сейсмических нагрузок. Фактически документ является методическими рекомендациями по применению конкретных конструктивных решений для значительной части объектов строительства.

Проектирование и строительство зданий и сооружений в Канаде осуществляется в соответствии с Национальным строительным кодексом Канады (National Building Code of Canada), требования которого в части применения древесины в строительстве уточняются в стандарте «Проектирование конструкций из древесины» (CSA 086 Engineering design in wood<sup>24</sup>).

Расчет ДК выполняется с помощью метода предельных состояний (LSD). Стандарт содержит требования, рекомендации и указания по проектированию конструкций из древесины, ее производных и композитов с их применением. Наряду с физико-механическими свойствами древесины, коэффициентами условий работы конструктивных элементов и алгоритмами определения несущей способности соединений таких элементов, в документе приведены рекомендации по использованию строительных изделий, получивших наибольшее распространение на строительном рынке, например двутавровых балок, стропильных панелей, а также систем соединения элементов конструкций. Значительное внимание уделено расчетным характеристикам и методикам определения несущей способности, огнестойкости элементов из ДПК (CLT) и систем их соединения, внесены рекомендации об их применении в качестве несущих стен, диафрагм и дисков жесткости.

Нормативно-техническая документация США и Канады содержит большой объем рекомендаций по использованию конкретных материалов, изделий, конструктивных систем, благодаря чему обеспечивается качество и эффективность применяемых решений на разных стадиях проектирования и строительства конкретных объектов.

По результатам проведенного в рамках исследования опроса (табл. 1) существенная доля респондентов (63 %) отметила необходимость модернизации требований к пожарной безопасности зданий и сооружений из ДК.

<sup>24</sup> CSA 086–19. Engineering design in wood. URL: <https://www.csagroup.org/store/product/2702965/>

<sup>22</sup> National Design Specification for Wood Construction 2018. URL: <http://www.plib.org/staging/wp-content/uploads/2020/09/AWC-NDS2018.pdf>

<sup>23</sup> Special Design Provisions for Wind and Seismic with Commentary (SDPWS). 2021. URL: <https://awc.org/publications/2021-sdpws/>

Насущная необходимость актуализации действующей НТД в области пожарной безопасности строительных конструкций из древесины отражена в современных научных публикациях. Многие исследователи [17] обращают внимание на актуальность задачи по разработке новых подходов к оценке показателей эффективности огнезащитных материалов и учета количественных характеристик потери несущей способности при воздействии огня на древесину, рекомендуя проведение необходимых НИ-ОКР с созданием профильных исследовательских групп. Другие авторы [18] упоминают об отсутствии нормативных требований в части пожарной безопасности для объектов минерально-сырьевого комплекса, в частности угольных шахт.

Базовый раздел, содержащий указания по обеспечению пожарной безопасности ДК, приведен в СП 64.13330.2017. Содержание доработанного раздела 10 «Пожарно-технические требования к конструкциям из древесины» действующей редакции указанного СП дает возможность проектировщикам проводить аналитические расчеты скорости обугливания древесины в условиях пожара, обосновывая остаточную несущую способность строительных элементов, что позволяет более эффективно обеспечивать выполнение требований в части предела огнестойкости конструкций из древесины, пожарной опасности конструкций и реализовывать рекомендации по применению огнезащитных составов.

Предел огнестойкости определяется по ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834-75)<sup>25</sup> и ГОСТ 30247.1–94<sup>26</sup>, с учетом таких факторов как температура обугливания древесины, время для достижения температуры обугливания древесины, условная скорость обугливания, «снижение температуры древесины по гиперболическому закону за фронтом обугливания». Огнестойкость узловых соединений и деревянных элементов, выполненных с применением других материалов, должна быть выше или равна требуемому пределу всей рассматриваемой конструкции. Для соединений элементов ДК на клеенных стержнях в п. 10.11 СП 64.13330.2017 содержится требование расчетного обоснования расстояния от границы обугливания до клееного шва, а в п. 8.36 СП 64.13330.2017 установлена необходимость обеспечения повышенной огнестойкости соединения.

Несмотря на совершенствование нормативной базы в области пожарной безопасности строительных конструкций с применением древесины в нашей стране по-прежнему существует дефицит

методик определения соответствующих характеристик для скрытых соединений с использованием механических связей.

Положения отечественных НТД сосредоточены на реализации мер пассивной огнезащиты (химической и конструкционной). При этом активным мерам защиты конструкций (например, автоматическим системам сигнализации и пожаротушения) должного внимания не уделено. Применение таких систем получило широкое распространение в зарубежных странах, на территории которых ведется активное строительство, в том числе многоэтажных деревянных зданий. Использование таких систем позволяет в значительной степени сократить риски, возникающие в части пожарной опасности при эксплуатации таких конструкций.

Нормативное применение активных систем противопожарной защиты в России регулируется согласно СП 485.1311500.2020<sup>27</sup> и ГОСТ Р 50680–94<sup>28</sup>, предъявляющим общие требования для установки систем пожаротушения без дополнительных сведений о влиянии их применения на требуемые характеристики конструкций.

Конкретные требования к пожарной безопасности объектов из древесины отражены в СП 2.13130.2020. В разделе 6.1 «Производственные здания и здания сельскохозяйственного назначения» приведена табл. 6.1, содержащая сведения для определения допустимой высоты зданий и площадей этажа в пределах пожарного отсека по степени огнестойкости, классу конструктивной пожарной опасности и этажности здания. Площади этажей в пределах пожарного отсека зданий для деревообрабатывающих производств и лесопильных цехов, выполненных из древесины, существенно меньше аналогичных значений для зданий из других материалов.

Нормы европейских стран предоставляют проектировщику определенный спектр методов определения горючести строительных материалов, часть из которых являются обязательными. Такой подход дает возможность повысить эффективность принятия решения по установлению класса пожарной опасности, что отражено в некоторых публикациях [19].

В мире получило широкое распространение применение комбинированных конструктивных систем при строительстве зданий с применением древесины. Такие методики, по мнению авторов настоящей статьи, заслуживают пристального изучения с последующей имплементацией в отечественную нормативно-техническую и методическую документацию.

<sup>25</sup> ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. М. : ИПК Издательство стандартов, 2003.

<sup>26</sup> ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. М. : ИПК Издательство стандартов, 1995.

<sup>27</sup> СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2020.

<sup>28</sup> ГОСТ Р 50680–94. Установки водяного пожаротушения автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний. М. : Издательство стандартов, 1994.

Применение в зарубежной строительной практике комбинированных конструктивных систем позволяет не только повышать пожарную безопасность ОКС, но и более эффективно использовать физико-механические свойства различных строительных материалов для обеспечения надежности и долговечности строительных конструкций зданий и сооружений. При реализации многоэтажных зданий с использованием древесины разрабатываются и применяются комбинированные (гибридные) конструктивные системы, позволяющие повышать надежность и эффективность строительных конструкций [20]. Примерами таких систем могут служить технология CREE SYSTEM (разработанная компанией Cree GmbH, Австрия), система Finding Forest Through Trees (FFTT) (предложенная канадским архитектором Майклом Грином), предлагающие использовать комбинации традиционных для многоэтажного строительства материалов (сталь и бетон) совместно с современными строительными изделиями на основе древесины. Среди таких систем можно выделить древесно-стальные композиты (TSC) [21], наиболее распространенные в РФ, за рубежом конструкции такого типа используются при строительстве мостов<sup>29, 30</sup>. Помимо этого, применяются древесно-бетонные композиты (ТСС)<sup>31</sup> [22] и древесно-древесные композиты (ТТС) [23], представляющие собой сочетание ДПК (CLT) и клееного бруса.

Строительство высокоэтажных зданий из древесины во многом стало возможным благодаря обеспечению требуемого уровня пожарной безопасности конструкций из древесины за счет применения систем пожаротушения. При строительстве Mjøstårnet в Норвегии<sup>32, 33, 34</sup> использовались спринклерные системы внутри и снаружи здания, включающие независимую подачу воды с дополнительной системой контроля. При строительстве многоэтажного здания из древесины НоНо Wien [24] в Вене также

были применены спринклерные системы пожаротушения. В зарубежной НТД можно выделить стандарт NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems<sup>35</sup>, содержащий методику установки спринклерных систем. Положения указанного документа при соответствующем обосновании могут служить примером при актуализации требований НТД РФ в части применения активных систем огнезащиты.

Основной канадский документ National Fire Code of Canada<sup>36</sup>, регламентирующий требования по обеспечению пожарной безопасности строительных конструкций, содержит положения, применяемые к деревянным элементам и конструкциям на основе древесины, с точки зрения достаточности остаточного сечения элемента в условиях пожара в течение нормированного промежутка времени. В п. 3.1.4.5 указанного документа закреплено требование по пассивной защите конструкций из древесины, представляющей собой пропитку древесины специальными огнезащитными составами (антипиренами) под давлением, согласно CAN/CSA-080 Series Wood Preservation, для обеспечения показателя распространения огня не более 25 единиц. Такой подход схож с подходом, применяемым в отечественной НТД, согласно СП 64.13330.2017, и странах ЕС, в которых пассивные методы пожарной защиты регулируются Еврокодом EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Part 1–2<sup>37</sup>.

Канадский стандарт Fire Safety Design in Buildings<sup>38</sup>, разработанный Canadian Wood Council (Канадским советом по древесине), обозначает необходимость использования комбинированных систем огнезащиты, представляющих собой совокупность мер пассивной защиты — химической и конструкционной, наряду с активными — спринклерных систем с пожарной сигнализацией.

Одним из наиболее ответственных этапов проектирования и строительства ДК является организация соединений их элементов посредством механических связей, чаще всего — металлических. Это требует реализации специальных мероприятий по защите таких крепежных элементов. Один из способов повышения огнестойкости таких

<sup>29</sup> Almere. URL: <https://www.schaffitzel.de/holzbrueckenbau/referenzen/almere>

<sup>30</sup> Drachenschwanz in Gera. URL: <https://www.schaffitzel.de/holzbrueckenbau/referenzen/drachenschwanz-in-gera>

<sup>31</sup> Vancouver's top planner, Gil Kelley, wants council to amend building code to allow 12-storey mass-timber buildings. URL: <https://www.straight.com/news/vancouvers-top-planner-gil-kelley-wants-council-to-amend-building-code-to-allow-12-storey-mass>

<sup>32</sup> Ensuring fire safety at world's tallest timber building Mjøstårnet. URL: <https://www.timbermedia.co.uk/ensuring-fire-safety-at-worlds-tallest-timber-building-mjostarnet/>

<sup>33</sup> Mjøstårnet Brumunddal. URL: <https://www.sweco.no/show-room/mjostarnet-brumunddal/>

<sup>34</sup> The world's tallest and safest timber building. URL: <https://brandogsikring.dk/en/news/2019/the-worlds-tallest-and-safest-timber-building/>

<sup>35</sup> NFPA 13. Standard for the Installation of Sprinkler Systems. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=13>

<sup>36</sup> National Fire Code of Canada 2020 — National Research Council Canada. URL: <https://nrc.canada.ca/en/certifications-evaluations-standards/codes-canada/codes-canada-publications/national-fire-code-canada-2020>

<sup>37</sup> EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1–2: General — Structural fire design. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.2.2004.pdf>

<sup>38</sup> Fire Safety Design in Buildings // Canadian Wood Council. URL: <https://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-FireSafetyDesign-s.pdf>

соединений, реализуемых в зарубежной практике, — использование скрытых соединений, в которых металлические детали погружены в древесину и не находятся под прямым воздействием огня в условиях пожара определенное время. Пример такого соединения приведен на рис. 3<sup>39</sup>.

Представленное на рис. 3, а соединение, выполненное посредством открытых металлических крепежных элементов, обладает пределом огнестойкости R15. При такой организации соединения в условиях огневого воздействия происходит уменьшение глубины погружения крепежа в древесину вследствие обугливания. На рис. 3, б элемент крепления является скрытым, т.е. погружен в древесину полностью и изолирован от воздействия от прямого пламени, что позволяет сохранить не-

сущую способность соединения в три раза дольше по сравнению с открытым соединением.

Аналогичный способ соединения деревянных элементов показан на рис. 4, 5<sup>40, 41</sup>.

В зарубежной строительной практике также используются меры пассивной конструктивной защиты, аналогичные применяемым в нашей стране. Так, например, согласно Fire Design Specification for Wood Construction<sup>42</sup>, разработанному AWC, рекомендуются такие варианты противопожарной за-

<sup>39</sup> Пластины и соединительные элементы для дерева. Строения, конструкции и террасы. URL: <https://www.rothoblaas.ru.com/katalogi-rothoblaas>

<sup>40</sup> Simpson Strong-Tie. Wood Construction Connectors. Mass Timber Connectors. URL: <https://embed.widencdn.net/pdf/plus/ssttoolbox/8shmjexat9/C-C-2021-p189-191.pdf>

<sup>41</sup> Simpson Strong-Tie. CBH Concealed Beam Hanger Minimum Fire Char and Fastener Edge Distances. URL: <https://ssttoolbox.widen.net/view/pdf/nuhgz0fsuy/L-C-CBHCHAR22.pdf?t.download=true&u=cjmyin>

<sup>42</sup> Fire Design Specification for Wood Construction. 2021. URL: <https://awc.org/wp-content/uploads/2021/12/2022-FDS-FINAL-09.13.22.pdf>

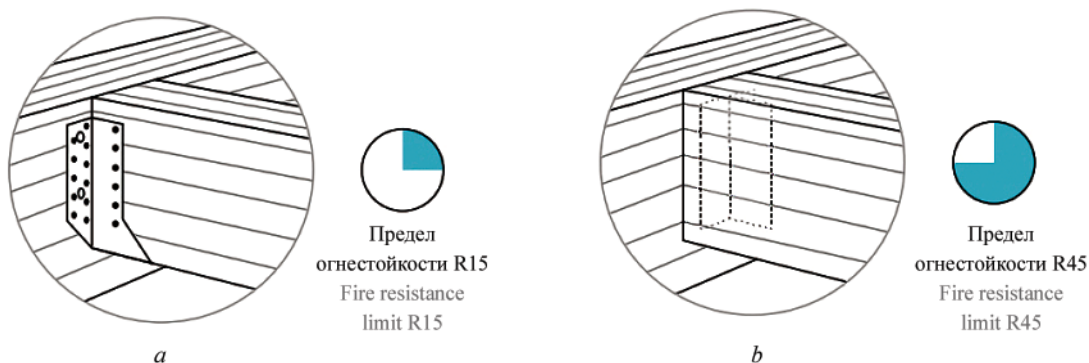


Рис. 3. Пример открытого (а) и скрытого (б) соединений от Rothoblaas

Fig. 3. Example of open (a) and hidden (b) connections from Rothoblaas

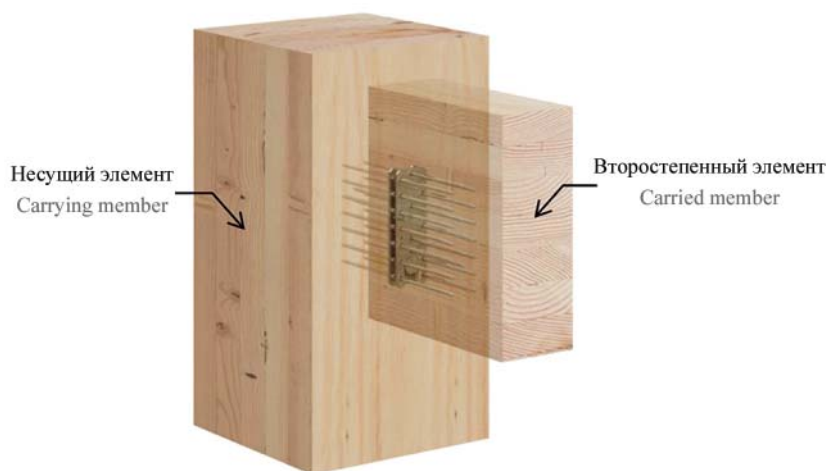


Рис. 4. Внешний вид скрытого соединения от Simpson Strong-Tie

Fig. 4. Appearance of the hidden connection from Simpson Strong-Tie



Проверка не проведена  
Untested assembly



Проверка проведена  
Tested assembly

Рис. 5. Внешний вид при воздействии огня на скрытое соединение

Fig. 5. Appearance when exposed to fire on a concealed joint

щиты при помощи огнеупорных изделий из гипсокартона; древесины; изоляции из минеральной ваты и стекловолокна.

Отечественная НТД слабо регулирует устройство скрытых соединений, а также степень их влияния на пожарную безопасность.

Рынок индивидуального жилищного строительства на территории РФ применяет многие виды современных строительных материалов и изделий из древесины без проведения экспертизы проектных решений, однако для строительства более ответственных объектов использование подобных строительных элементов затруднено нехваткой соответствующей технической информации в НТД РФ. Согласно результатам проведенного опроса более 70 % респондентов отмечают необходимость расширения базы используемых материалов и изделий на основе древесины, а также проблему дефицита нормативно-методической документации в области деревянного строительства.

В настоящее время активно развивается производство и применение клееных плит из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Производством занимаются, например, АО «Ладожский домостроительный комбинат» (Волховский район Ленинградской области) и ООО «Сокол СиЭлТи», работающее на площадке Сокольского деревообрабатывающего комбината (г. Сокол, Вологодская область) и ведущее активную работу по продвижению материала на отечественном строительном рынке совместно с ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Разрабатывается и актуализируется документация для применения строительных изделий из ДПК (CLT), например СТО 16.23.1-001-6202182–2022 «Конструкции из древесины перекрестноклееной. Общие технические требования».

Основной документ, устанавливающий требования к плитам ДПК (CLT) в РФ, — ГОСТ Р

56706–2015<sup>43</sup>, регламентирующий требования, правила приемки и методы испытаний к ним. Однако в указанном стандарте отсутствует исчерпывающая информация о физико-механических характеристиках материала, необходимая для эффективного применения строительных элементов на его основе.

В последнюю редакцию СП 64.13330.2017 были включены требования и рекомендации для расчета строительных элементов из ДПК (CLT). Например, Требования к свойствам таких строительных изделий (Приложение Г) включены в п. 6.14, закрепляющий алгоритм определения нормативных сопротивлений для ДПК (CLT).

Методика, используемая в настоящее время для расчета данных строительных элементов, предполагает значительный запас из-за исключения из работы (в рамках расчета) условно «неработающих» слоев многослойной конструкции. Согласно п. 7.9 СП 64.13330.2017, расчетный момент инерции устанавливается без учета слоев, которые расположены перпендикулярно направлению нормальных напряжений. Дальнейшие исследования материала в направлении актуализации методик расчета и определения огнестойкости строительного элемента помогут в значительной степени раскрыть потенциал строительных элементов и конструкций на его основе.

В США ДПК (CLT) используется довольно давно, термин в 2015 г. был включен в Международный строительный код (International Building Code — IBC)<sup>44</sup>. Также применение ДПК (CLT) регламентируется в 2018 Edition of the National Design Specification (NDS) for Wood Construction.

<sup>43</sup> ГОСТ Р 56706–2015. Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2016.

<sup>44</sup> 2021 International Building Code®. URL: <https://shop.iccsafe.org/2021-international-building-coder.html>

В ЕС регулирование применения указанного материала в строительстве закреплено в Еврокодах EN 1995-1-1: Eurocode 5: Part 1–1 и EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Part 1–2, вместе с которыми некоторые страны используют собственные национальные приложения. Германия использует DIN EN 1995-1-1/NA (DIN 2013)<sup>45</sup>, который не содержит специальных рекомендаций по применению ДПК (CLT) в строительстве, но в немецкие национальные технические сертификаты (German National Technical Approvals — NTAs) производителей ДПК (CLT) они включены. Австрия использует национальное приложение ÖNORM B 1995-1-1 (ASI 2015)<sup>46</sup>, в котором приведены основные характеристики для ДПК (CLT).

В Канаде регулирование использования ДПК (CLT) как строительного материала осуществляется документом CSA 086 Engineering design in wood, в текущей редакции которого была обновлена терминология и исключен из списка форм-фактор сдвига для такого типа изделий.

Применение ДПК (CLT) также широко распространено в модульном строительстве [25], активно развивающемся как на мировых рынках, так и в нашей стране.

Еще одним широко используемым изделием на отечественном строительном рынке являются двутавровые деревянные балки со стенкой из древесной плиты с ориентированной стружкой (ОСП) (Oriented strand board — OSB), применяемые в основном для организации междуэтажных перекрытий. Такие деревянные элементы способны перекрывать значительные пролеты благодаря оптимизации геометрических характеристик сечения, возможной при комбинировании материалов внутри сечения.

Методика расчетов подобных строительных элементов на территории РФ закреплена СП 64.13330.2017 и выполняется по методу приведенного поперечного сечения с проверкой несущей способности поясов, стенки и клееного шва. Однако в документе приведен алгоритм расчета для стенки, выполненной из фанеры, в свою очередь ОСП по своим физико-механическим свойствам имеет значительные отличия. Также в документе отсутствуют общие рекомендации по конструированию, например правила расстановки ребер жесткости или способы соединения стенки по длине.

Технические условия, предъявляемые к ОСП в РФ, сформулированы в ГОСТ Р 56309–2014<sup>47</sup>. Документ прямо указывает: «Применение плит для конкретных видов продукции и в строительстве устанавливается соответствующими нормативны-

<sup>45</sup> DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-1995-1-1-na/188145635>

<sup>46</sup> ÖNORM B 1995-1-1 (ASI 2015).

<sup>47</sup> ГОСТ Р 56309–2014. Плиты древесные строительные с ориентированной стружкой (OSB). Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

ми документами и технической документацией...» и не содержит в полной мере характеристик материалов, необходимых для выполнения расчета двутавровых деревянных балок со стенкой из ОСП по методике, закрепленной СП 64.13330.2017.

Зарубежная нормативно-техническая база содержит более полное описание физико-механических свойств ОСП как строительного материала, что позволяет выполнять расчет составного сечения рассматриваемых строительных элементов. Для регулирования использования указанного материала и изделий из него в США используется документ 2021 International Building Code (IBC), в Канаде — CSA O86 Engineering design in wood, в Евросоюзе BS EN 300:2006<sup>48</sup>. Во многих странах проектирование строительных конструкций с применением двутавровых балок со стенкой из ОСП осуществляется в соответствии с пособиями и рекомендациями от производителей таких элементов. Выполнение таких рекомендаций обеспечивает соответствие принимаемых решений действующим нормативным документам. Например, новозеландская компания NZWOOD разработала руководство Design and Installation Guide<sup>49</sup>, основанное на стандартах NZS 3604:2011<sup>50</sup>, NZS 3603:1993<sup>51</sup>, AS 1720.1–2010<sup>52</sup>, AS/NZS 1170.0:2002<sup>53</sup> и содержащее информацию о конструкции строительных изделий, способах их соединения и расчетных характеристиках. В Швеции разработано руководство Masonite Beams Technical Guide for Floor Applications<sup>54</sup>, содержащее рекомендации по применению двутавровых балок с ОСП стенкой в качестве несущей основы конструкций перекрытия. Руководство Georgia-Pacific

<sup>48</sup> BS EN 300:2006. Oriented strand boards (OSB). Definitions, classification and specifications. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-300-2006-oriented-strand-boards-osb-definitions-classification-and-specifications/>

<sup>49</sup> NZWOOD. Design and Installation Guide. URL: <https://nzwoodproducts.co.nz/media/products/brands/resources/2015/ibuilt-design-installation-guide.2c5be2a4adbc.pdf>

<sup>50</sup> NZS 3604:2011. Timber-framed buildings. URL: <https://www.standards.govt.nz/shop/nzs-36042011/>

<sup>51</sup> NZS 3603:1993. Timber Structures Standard. URL: <https://www.standards.govt.nz/shop/nzs-36031993/>

<sup>52</sup> AS 1720.1–2010. Timber Structures. Part 1: Design Methods. URL: <https://www.studocu.com/en-au/document/university-of-tasmania/steel-and-timber-structures/as-17201-2010-timber-structures-part-1-design-methods/6797417>

<sup>53</sup> AS/NZS 1170.0:2002. Structural design actions — Part 0: General principles. URL: <https://www.standards.govt.nz/shop/asnzs-1170-02002/>

<sup>54</sup> Sodra. Masonite Beams Technical Guide for Floor Applications. 2021. 20 p. URL: [https://www.sodra.com/\\_download/sp/masonite-beams-technical-guide-for-floors](https://www.sodra.com/_download/sp/masonite-beams-technical-guide-for-floors)

Wood Products<sup>55</sup>, выпущенное в США, содержит рекомендации по применению таких строительных элементов, описание их характеристик и типовых узлов соединения.

Также широкое распространение на отечественном строительном рынке получили балки на металлических зубчатых кронштейнах (МЗК), представляющие собой балки-фермы с параллельными поясами, выполненными из пиломатериалов, совместность работы которых обеспечивают запрессованные в них штампованные металлические зубчатые кронштейны (в редакции СП 516.1325800.2022 «Здания из деревянных срубных конструкций. Правила проектирования и строительства» термин заменен на «металлические зубчатые косяки»). Балки на МЗК используются в конструкциях из смешанных материалов, а не только при строительстве полностью деревянных зданий.

Рекомендации по применению таких строительных изделий в НТД на территории РФ практически отсутствует. Краткая справочная информация о балках-фермах на МЗК приведена в СП 516.1325800.2022, где зафиксирована возможность применения таких строительных элементов для организации перекрытий и дано описание некоторых особенностей таких конструктивных решений. Необходимо отметить, что применение балок на МЗК на отечественном рынке малоэтажного строительства зачастую ведется на основании различных рекомендаций, например от ООО «МиТек Индастрис Ру»<sup>56</sup>, представляющих собой во многом маркетинговые издания, содержащие ссылки на зарубежные нормативные документы и не позволяющие проверить расчетом многие предлагаемые решения. В настоящее время на базе СПбГАСУ ведется активная исследовательская работа по изучению технических характеристик строительных элементов с применением МЗК, результаты которой, в том числе, могут быть использованы в дальнейшей работе по модернизации НТД РФ в области деревянного строительства.

В зарубежной практике применение подобных строительных элементов осуществляется в соответствии с методическими указаниями производителей, следование которым обеспечивает соответствие принимаемых решений требованиям действующих НТД. Примером могут служить рекомендации от MiTek<sup>57</sup> по проектированию с применением выпускаемой этой компанией продукции.

<sup>55</sup> Wood I Beam. Joists Georgia-Pacific Wood Products. URL: <https://sherwoodlumber.com/wp-content/uploads/pdf/Wood-Beam-Joists-Specs.pdf>

<sup>56</sup> The World of Posi Technology. MiTek, 2019. 31 p.

<sup>57</sup> MiTek. The Posi-Joist Technical Handbook. Issue 7. URL: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/b9e44cf6/files/uploaded/Posi%20Joist%20-%20Technical%20Handbook%20%28Issue%207%29.pdf>

Компанией разработана номенклатура балок в зависимости от типа их применения в качестве несущих элементов перекрытий, покрытий и стен. Британская компания DWB разработала руководство Posi-Joist Standard Installation Details<sup>58</sup>, содержащее основные сведения по применению POSI-балок (балок на МЗК) с типовыми узлами и решениями, а также пояснительной частью.

В нашей стране сформирован значительный в масштабах малоэтажного строительства рынок использования КТП (SIP) в качестве несущей основы индивидуальных жилых домов. Технология позволяет значительно экономить время монтажа конструкций на строительной площадке благодаря небольшому весу элементов и упрощенной схеме организации узлов их соединения. Также применение таких строительных изделий дает возможность сократить энергопотребление при эксплуатации объекта [26]. Участники рынка, применяющие рассматриваемую технологию, объединены в Ассоциацию домостроительных технологий СИП, ведущую разработку нормативно-технической и методической документации для строительства. Кроме того, отдельными производителями разрабатываются собственные технические условия и руководства, например «Как собрать СИП дом самому? Руководство по строительству домов по технологии SIP» [27], от компании «Виллози Хаус».

Предприятиям, работающим с КТП (SIP) в строительстве, необходим нормативно-методический документ, закрепляющий физико-механические свойства и алгоритмы применения таких панелей — определения несущей способности комpositного сечения, требования к клеям, способам соединения элементов, определение пределов огнестойкости конструкций. На территории РФ таких стандартов не существует, применяются лишь документы, регламентирующие технические условия отдельных компонентов.

Конструктивные теплоизоляционные панели (SIP) являются одним из довольно популярных строительных изделий за рубежом. Технология применяется в Северной Америке со второй половины XX в., постоянно развиваясь. Включение раздела R610 в International Residential Code (IRC) в 2018 г. позволило использовать КТП без проведения дополнительных работ по экспертизе и проектированию.

Активным развитием нормативно-технической и методической базы США в рассматриваемой области занимается Ассоциация конструктивных теплоизоляционных панелей (Structural Insulated Panel Association), разрабатывая пособия и рекомендации по применению указанных изделий в строительстве, содержащие как типовые решения, так и алгоритмы расчета и проектирования в конкрет-

<sup>58</sup> Posi-Joist Standard Installation Details. URL: <https://dwbgroupp.co.uk/wp-content/uploads/2018/07/Standard-Installations-Detail-V0.9.2.pdf>

ных условиях. Так, в разделе<sup>59</sup>, посвященном сейсмичности, определено, что стены из КТП работают таким же образом, как и обычные стены из легкого каркаса. Для установления огнестойкости в работе<sup>60</sup> зафиксированы требования, которые могут меняться в зависимости от производителя. Также в США разработано руководство Structural Insulated Panels Product Guide<sup>61</sup>, содержащее рекомендации по применению КТП в строительстве.

Среди зарубежных стандартов необходимо выделить ANSI/APA PRS 610.1–2018 «Standard for Performance-Rated Structural Insulated Panels in Wall Applications»<sup>62</sup>, содержащий рекомендации по применению и технические характеристики стен из КТП, методы их сертификации, маркировки и номенклатуру изделий. Разработка новых и актуализация действующих НТД в рассматриваемых регионах ведется постоянно. Примером этого процесса может служить разработка стандартов подкомитетом ISO/TC 165.

Разрабатываемый стандарт ISO/AWI 16229 «Timber structures — Laminated strand lumber and oriented strand lumber — Structural properties»<sup>63</sup> в перспективе будет представлять определенный интерес в части применяемых в строительстве изделий из древесины ввиду определения в нем характеристик строительных изделий из конструктивных композитных материалов (Structural Composite Lumber — SCL) — элементов из плоских древесных стружек (Laminated Strand Lumber — LSL) и ориентированных древесных стружек (Oriented Strand Lumber — OSL), которые пока практически не представлены на отечественном строительном рынке.

Наибольшее внимание для рассмотрения в ближайшем будущем заслуживают разрабаты-

ваемые стандарты ISO/DIS 24322 «Timber structures — Methods of test for evaluation of long-term performance — Part 1: wood-based products in bending»<sup>64</sup> и ISO/DIS 24323 «Timber structures — Design methods for vibrational serviceability of timber floors»<sup>65</sup>. Первый документ установит требования к методикам испытаний для оценки долговечности деревянных изделий при изгибе, второй — должен описать методики расчета виброустойчивости деревянных полов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования проанализирована НТД, действующая в РФ и на территориях США, Канады и стран ЕС. Стоит отметить развитую структуру руководств и пособий по конструкциям и изделиям из древесины в зарубежных странах, обеспечивающую применение эффективных решений при проектировании, производстве и строительстве зданий и сооружений с использованием ДК. Совершенствование аналогичной нормативно-методической базы в РФ способно стимулировать развитие деревянного строительства и компенсировать сложности актуализации и введения дополнительных документов верхнего уровня (ГОСТ, СП). При разработке подобной отечественной документации целесообразно обратить внимание на такие зарубежные пособия и сборники рекомендаций, как Design for Code Acceptance (DCA), Wood Construction Data (WCD), Design Aid (DA) Series, выпущенные на территории США.

В области пожарной безопасности ДК в нормативно-технической базе зарубежных стран, по мнению авторов статьи, применяется более взвешенный комбинированный подход, позволяющий учитывать как пассивные, так и активные методы защиты конструкций от огня, что в свою очередь дает возможность использовать древесину при возведении ответственных ОКС. Действующая в России НТД в этом вопросе нуждается в модернизации, в частности, в области применения активных систем противопожарной защиты и их влияния на пожарную безопасность зданий и сооружений.

Отсутствие пособий и рекомендаций в сфере применения современных строительных изделий и материалов на основе древесины значительно снижает темпы развития деревянного строитель-

<sup>59</sup> SIPA TECHNICAL BULLETIN NO. 11. Equivalency of SIP Walls to Light Frame Wood Construction Subjected to Seismic Loading. URL: [https://www.sips.org/documents/SIPA\\_Technical\\_Bulletin\\_No.11\\_Equivalency\\_of\\_SIP\\_Walls\\_to\\_Light\\_Frame\\_Wood\\_Construction\\_Subjected\\_to\\_Seismic>Loading\\_012021.pdf](https://www.sips.org/documents/SIPA_Technical_Bulletin_No.11_Equivalency_of_SIP_Walls_to_Light_Frame_Wood_Construction_Subjected_to_Seismic>Loading_012021.pdf)

<sup>60</sup> SIPA TECHNICAL BULLETIN NO. 02. Fire Safety with Structural Insulated Panel Construction. URL: [https://www.sips.org/documents/SIPA\\_TB\\_02\\_Fire-Safety-with-SIP-Construction.pdf](https://www.sips.org/documents/SIPA_TB_02_Fire-Safety-with-SIP-Construction.pdf)

<sup>61</sup> APA Structural Insulated Panels Product Guide, APA, The Engineered Wood Association. URL: <https://www.sips.org/store/product-guide-to-structural-insulated-panels>

<sup>62</sup> ANSI/APA PRS 610.1–2018. Standard for Performance-Rated Structural Insulated Panels in Wall Applications. URL: <https://www.sips.org/documents/ANSI-Standard-for-SIPs-in-Wall-Applications.pdf>

<sup>63</sup> ISO/AWI 16229. Timber structures — Laminated strand lumber and oriented strand lumber — Structural properties. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/84526.html>

<sup>64</sup> ISO/DIS 24322. Timber structures — Methods of test for evaluation of long-term performance — Part 1: wood-based products in bending. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/78429.html>

<sup>65</sup> ISO/DIS 24323. Timber structures — Design methods for vibrational serviceability of timber floors. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/78430.html>

ства и заставляет использовать устаревшие технологии либо применять современные решения при невозможности их нормативного обоснования. Сочетание этого факта с дефицитом квалифицированных инженерно-технических кадров приводит к уменьшению доверия потребителя к объектам, возведенным с применением ДК.

Строительная отрасль остро нуждается во внедрении НТД с конкретными требованиями и рекомендациями по обеспечению надежности, пожарной безопасности и сейсмостойкости зданий и сооружений с использованием новых материалов и изделий на основе древесины. Для упрощения взаимодействия органов экспертизы и организаций, занимающихся производством, проектированием и строительством зданий и элементов зданий из древесины, рекомендуется разработать документы прикладного характера (пособия, руководства, рекомендации и др.). В настоящее время информация прикладного характера распределена в НТД неоднородно. Например, указания

об особенностях применения конструкций на МЗП и МЗК находятся в своде правил, посвященном срубным конструкциям.

Также в отечественной НТД отсутствуют документы, регламентирующие проектирование и использование древесных композитов. В связи с этим рекомендуется внести ряд терминов и определений в СП 64.13330.2017 с учетом необходимости последующей разработки стандартов, регулирующих технические условия на древесно-стальные, древесно-бетонные и древесно-деревянные композиты.

По результатам исследования выявлены положения ряда отечественных нормативных документов, требующие доработки в части снятия неактуальных ограничений, накладываемых на ДК (табл. 3).

Доработка и актуализация НТД, указанных в пп. 4–6 табл. 3, может быть проведена в рамках мероприятий по развитию деревянного домостроения совместно с Минстроем и МЧС РФ с привлечением участников рынка деревянного домостроения.

**Табл. 3.** Выявленные требования, предлагаемые к разработке, переработке или отмене в отечественной НТД

**Table 3.** Identified requirements proposed for the development, processing or cancellation in the domestic regulatory and technical documentation

Наименование НТД Name of technical regulations	Тип замечания Type of comment	Примечание Notes
СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменениями № 1–3)» SR 64.13330.2017 "Timber structures. Updated edition of SNiP II-25-80 (as amended No. 1–3)"	Доработка Improvement	В области сейсмических воздействий: Раздел 9 п. 9.13 In the area of seismic effects: Section 9 p. 9.13
	Доработка Improvement	В области пожарной безопасности: 4.1. Термины и определения Раздел 8 Раздел 10 In the field of fire safety: 4.1 Terms and definitions Section 8 Section 10
	Доработка Improvement	В области расширения номенклатуры материалов и изделий: Раздел 5–9 In the area of expanding the range of materials and products: Section 5–9
СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*» SR 14.13330.2018 "Seismic building design code. Updated edition SNiP II-7-81**"	Доработка Improvement	В области сейсмических воздействий: п. 6.1.5 п. 6.3.5 п. 6.3.6 п. 6.15.3 In the area of seismic effects: p. 6.1.5 p. 6.3.5 p. 6.3.6 p. 6.15.3
	Отмена Cancellation	
	Отмена Cancellation	
	Доработка Improvement	
	Доработка Improvement	

Наименование НТД Name of technical regulations	Тип замечания Type of comment	Примечание Notes
Пособие по проектированию и строительству деревянных конструкций в сейсмических районах Manual for the design and construction of timber structures in seismic areas	Разработка Development	В области сейсмических воздействий: с учетом различных типов применяемых строительных изделий и конструктивных систем (каркасно-панельная технология, ДПК, КТП и т.д. (см. п. 4.3.3)) In the area of seismic effects: considering the different types of applied building products and construction systems (frame and panel technology, CLT, SIP, etc. (see point 4.3.3))
СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» SR 2.13130.2020 "Systems of fire protection. Fire-resistance security of protecting units"	Доработка Improvement	В области пожарной безопасности: Табл. 6.1 п. 6.5.2 п. 6.6.2 п. 6.7.9 п. 6.7.11 п. 6.7.19 In the area of fire safety: Table 6.1 p. 6.5.2 p. 6.6.2 p. 6.7.9 p. 6.7.11 p. 6.7.1
СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям (с Изменениями № 1, 2)» SR 4.13130.2013 "Systems of fire protection. Restriction of fire spread at object of defense. Requirements to special layout and structural decisions (as amended No. 1, 2)"	Доработка Improvement	В области пожарной безопасности: Разделы 4–6 In the area of fire safety: Section 4–6
Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция) Federal Law "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" of 07.22.2008 No. 123-FZ (latest revision)	Доработка Improvement	В области пожарной безопасности: Статьи 87–89 In the area of fire safety: Article 87–89
Пособие к СНиП II-25–80 Handbook for Building codes and regulations II-25–80	Доработка Improvement	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Древесина перекрестноклееная (ДПК). Технические условия» GOST "Cross laminated timber (CLT). Technical conditions"	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Двухтавровые балки (I-балки) с ОСП стенкой. Технические условия» GOST "I-beams with OSB wall. Technical conditions"	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Балки на металлических зубчатых кронштейнах (POSI-балки). Технические условия» GOST "Beams on metallic toothed brackets (POSI-beams). Technical conditions"	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Наименование НТД Name of technical regulations	Тип замечания Type of comment	Примечание Notes
ГОСТ «Конструктивные теплоизоляционные панели (КТП). Технические условия» GOST “Structural insulating panels (SIP). Technical conditions”	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Древесно-стальные композиты. Технические условия» GOST “Timber-steel composites. Technical conditions”	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Древесно-бетонные композиты. Технические условия» GOST “Timber-concrete composites. Technical specifications”	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products
ГОСТ «Древесно-деревянные композиты. Технические условия» GOST “Timber wood composites. Technical specifications”	Разработка Development	В области расширения номенклатуры материалов и изделий In the area of expanding the range of materials and products

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на значительные преимущества отечественных НТД по целому ряду направлений применения деревянных конструкций при строительстве уникальных зданий и сооружений, например в части использования клеенных стержней в узлах соединения элементов деревянных конструкций, в области массового строительства из древесины, сегодня ощущается значительный дефицит нормативно-технического обеспечения. В рамках проведенного исследования ставилась максимально прикладная задача — обозначение актуальных проблем в области нормативно-технического обеспечения массового применения конструкций и элементов на основе древесины в строительстве. Сегодня на отечественном рынке деревянного домостроения сложилась ситуация, предполагающая использование рассматриваемых материалов и изделий главным образом в малоэтажном домостроении. При этом на мировом рынке существует тенденция к повышению этажности возводимых с применением древесины зданий. Запрос на расширение возможностей применения деревянных конструкций в более сложных и современных конструктивных системах сформирован и в нашей стране как со стороны профессионального сообщества, так и частично со стороны потребителя. Однако избыточные нормативные ограничения и пробелы не только затрудняют перспективное развитие индустрии, но и вызывают сложности в малоэтажном домостроении. Таким образом, представляется необходимым определение «болевых точек» в рассматриваемом секторе отечественного строительного рынка для их исключения и придания дополнительного импульса развития в русле обозначенных мировых трендов.

По результатам исследования сформулированы варианты развития НТД в области деревянного строительства на территории РФ. Результаты анализа отечественной и зарубежной документации, а также участники рынка подтверждают необходимость актуализации и модернизации НТД на территории РФ в части пожарной безопасности, сейсмостойкости и возможности обоснованного применения строительных элементов из древесины и ее производных для развития деревянного строительства, включая многоэтажное. Следует отметить дефицит нормативно-методической документации с конкретными указаниями и рекомендациями по применению строительных материалов и изделий на основе древесины с учетом требований действующей НТД. Толчком к развитию многоэтажного строительства из древесины будет являться актуализация и создание новых нормативно-методических пособий по существующим и уже широко применяемым в малоэтажном строительстве материалам и изделиям на основе древесины, таким как ДПК (CLT), балки на МЗК, КТП (SIP).

Рассмотренные в настоящей статье зарубежные источники не подлежат дословному переводу и имплементации в отечественную нормативную базу, но рекомендуются в качестве ориентиров для ее перспективного развития. В любом случае внедрение новых стандартов, актуализация существующих документов, в том числе через их гармонизацию с зарубежными аналогами, может происходить исключительно через проведение соответствующих НИОКР с учетом текущей конъюнктуры рынка строительных конструкций, состояния нормативно-правовой системы и технологических возможностей индустрии. Авторы настоящей статьи полностью разделяют представленный в работе [7] тезис о необходимости обеспечения преемственности

нововведений при разработке норм проектирования во избежание потери колоссального багажа знаний и опыта, накопленного предшественниками при разработке действующей НТД.

По мнению авторов статьи, оптимальная структура НТД в области деревянного строительства может быть достигнута при ее реализации на нескольких уровнях. Основной нормативный документ в области деревянного строительства СП 64.13330 должен включать обязательные требования к проектированию и строительству зданий и сооружений с применением древесины и изделий из нее. Следующий детализирующий уровень должен включать

методические документы, содержащие технические требования и рекомендации по применению конкретных видов деревянных конструкций, таких как срубные, каркасно-панельные, конструкции с применением ДПК (CLT) и др. Система государственных стандартов в рассматриваемой области должна охватывать технические условия на отдельные материалы и изделия из древесины, описывающие их физико-механические свойства и расчетные характеристики. Предлагаемая структура НТД в области деревянного строительства имеет возможность динамичного развития с учетом развития номенклатуры материалов, расчетных методик и прикладных технологий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коновалов М.А., Козинец Г.Л. Алгоритм разработки расчетной модели деревянного многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 463–475. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.463-475
2. Fragiaco M., Dujic B., Sustersic I. Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 11. Pp. 3043–3053. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.020
3. Bruno R., Bevilacqua P., Cuconati T., Arcuri N. Energy evaluations of an innovative multi-storey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas // Applied Energy. 2019. Vol. 238. Pp. 929–941. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.035
4. Jithin K.F., Thankachan T.P., Mathew J., Mervin J.T., Kurian J. Investigations on mechanical properties of wood composite for sustainable manufacturing // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 72. Pp. 3111–3115. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.428
5. Bello-Bravo J., Lutomia A.N. Sustainable development or developmental sustainability: Two cases of indigenous knowledge and practices for sustainable sourcing for wood-based design-solutions // Trees, Forests and People. 2022. Vol. 8. P. 100253. DOI: 10.1016/j.tfp.2022.100253
6. Pelli P. Service innovation and sustainable construction: Analyses of wood vis-à-vis other construction projects // Cleaner Engineering and Technology. 2021. Vol. 2. P. 100061. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100061
7. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 35–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41 EDN ZAHMEX.
8. Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 426–434.
9. Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81–97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97 EDN JEVVCF.
10. Balasbaneh A.T., Sher W. Comparative sustainability evaluation of two engineered wood-based construction materials: Life cycle analysis of CLT versus GLT // Building and Environment. 2021. Vol. 204. P. 108112. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108112
11. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62–80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80
12. Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Особенности применения клееных деревянных конструкций в сейсмических районах // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 2 (301). С. 31–38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38
13. Арзуманов А.А., Сушкова Е.Е., Жукова Е.В. Анализ технологических параметров возведения объектов многоэтажного строительства с применением деревянных конструкций // Строительство и недвижимость. 2022. № 1 (10). С. 26–33. EDN FVQMMЕ.
14. Салимуллин А.Р., Смирнов П.Н. Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестно-клееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 1 (32). С. 53-64. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64
15. Герасимович А.А., Агафонов С.А. Обзор мирового опыта проектирования и строительства многоэтажных зданий на основе клееных деревянных

конструкций // Вестник магистратуры. 2020. № 5–3 (104). С. 70–77. EDN SLJLCL.

16. Траузи В.И., Шарунов Р.Ш., Волков Ю.С. Вопросы совершенствования строительных норм // Бетон и железобетон. 2021. № 4 (606). С. 3–7. EDN OOKDBU.

17. Федотов И.О., Сивенков А.Б. Проблемы и перспективы применения огнезащитных средств для деревянных конструкций // Проблемы техно-сферной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. 2021. № 10. С. 65–69. EDN TVLHUQ.

18. Ключ В.В., Косенко Д.В., Бондаренко Д.С. О пассивной огнезащите на подземных объектах минерально-сырьевого комплекса // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2020. № 3 (35). С. 26–29. EDN HJDSGK.

19. Гравит М.В., Юминова М.О., Симоненко Я.Б. Метод SBI для определения пожарно-технических характеристик деревянных конструкций с огнезащитными лаками // Пожарная и аварийная безопасность : сб. мат. XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 370-й годовщине образования пожарной охраны России. 2019. С. 25–31. EDN PWPGRP.

20. Герасимович А.А., Агафонов С.А. Конструктивные системы многоэтажных зданий на основе клееных деревянных конструкций // Вестник магистратуры. 2020. № 5–5 (104). С. 30–40. EDN QNEUMV.

21. Le T.D.H., Tsai M.-T. Experimental Assessment of the Fire Resistance Mechanisms of Timber-

Steel Composites // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 23. P. 4003. DOI: 10.3390/ma12234003

22. Auclair S.C., Sorelli L., Salenikov A. Simplified nonlinear model for timber-concrete composite beams // International Journal of Mechanical Sciences. 2016. Vol. 117. Pp. 30–42. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2016.07.019

23. Shahnewaz M., Dickof C., Tannert T. Bending performance of timber-timber composite floors // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 511–517. DOI: 10.1007/978-981-19-0656-5\_43

24. Gower P. Timber towers. URL: <https://www3.rics.org/uk/en/modus/built-environment/construction/timber-towers.html>

25. Bhandari S., Jahedi S., Riggio M., Muszynski L., Luo Z., Polastri A. CLT modular low-rise buildings: a DFMA approach for deployable structures using low-grade timber // World Conference in Timber Engineering: conference. 2021.

26. Курманов А.С., Курманов К.С., Курманова Е.В. Руководство по строительству домов по технологии SIP. СПб., 2020. 184 с.

27. Король Е.А., Журавлева А.А. Влияние работы энергопотребителей при возведении малоэтажных жилых зданий на состояние окружающей среды // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 108–114. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-108-114 EDN LBPFCI.

Поступила в редакцию 9 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Сергей Александрович Агафонов — ассистент ВШГиЭС; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 7944-9351, ResearcherID: ННМ-5486-2022, ORCID: 0000-0001-5742-8532, Scholar ID: sBe\_I2AAAAAJ; agafonov\_sa@spbstu.ru;

Владимир Алексеевич Волкодав — генеральный директор; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, кор. 2 литер А, офис 4.24; РИНЦ ID: 7902-1318; vva@niccps.ru;

Иван Алексеевич Волкодав — кандидат технических наук, директор по науке; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, кор. 2 литер А, офис 4.24; РИНЦ ID: 1140-1800; via@niccps.ru;

Ирина Дмитриевна Титова — инженер-проектировщик; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, кор. 2 литер А, офис 4.24; SPIN-код: 8288-6627; tid@niccps.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Konovalov M.A., Kozinets G.L. Algorithm for developing a computational model of a wooden multi-storey building. *Vestnik MGSU* [Monthly

Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):463-475. DOI: 10.22227/19970935.2022.4.463-475 (rus.).

2. Fragiacomio M., Dujic B., Sustersic I. Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions. *Engineering Structures*. 2011; 33(11):3043-3053. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.020
3. Bruno R., Bevilacqua P., Cuconati T., Arcuri N. Energy evaluations of an innovative multi-storey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas. *Applied Energy*. 2019; 238:929-941. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.035
4. Jithin K.F., Thankachan T.P., Mathew J., Mervin J.T., Kurian J. Investigations on mechanical properties of wood composite for sustainable manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 72:3111-3115 DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.428
5. Bello-Bravo J., Lutomia A.N. Sustainable development or developmental sustainability: Two cases of indigenous knowledge and practices for sustainable sourcing for wood-based design-solutions. *Trees, Forests and People*. 2022; 8:100253. DOI: 10.1016/j.tfp.2022.100253
6. Pelli P. Service innovation and sustainable construction: Analyses of wood vis-à-vis other construction projects. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021; 2:100061. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100061
7. Pogoreltsev A.A., Pyatikrestovskiy K.P. Issues of further development and improvement of design standards for wood structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 3:35-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41 EDN ZAHMEX. (rus.).
8. Abdrakhmanova L.A., Khantimirov A.G., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer nano-modified polyvinylchloride composite building materials. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2018; 13(4):426-434. (rus.).
9. Filimonov M.A., Smirnov P.N. Research of strength and elastic characteristics of russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2022; 2:81-97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97 EDN JEVVCF. (rus.).
10. Balasbanch A.T., Sher W. Comparative sustainability evaluation of two engineered wood-based construction materials: Life cycle analysis of CLT versus GLT. *Building and Environment*. 2021; 204:108112. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108112
11. Bubis A.A., Gizyatullin I.R., Khvorova A.N., Petrov I.Yu. Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2022; 2:62-80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80 (rus.).
12. Pogoreltsev A.A., Turkovskiy S.B. Features of application of glulam structures in seismic areas. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022; 2(301):31-38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38 (rus.).
13. Arzumanov A.A., Sushkova E.E., Zhukova E.V. Analysis of technological parameters of construction of objects of multi-storey construction using wooden structures. *Construction and Property*. 2022; 1(10):26-33. EDN FVQMME. (rus.).
14. Salimullin A.R., Smirnov P.N. Development and research of screwed cross-laminated timber nodal joints for multi-storey buildings. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022; 32(1):53-64. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64 (rus.).
15. Gerasimovich A.A., Agafonov S.A. Review of international experience in the design and construction of multi-storey buildings based on glulam timber structures. *Master's Bulletin*. 2020; 5-3(104):70-77. EDN SLJLCL. (rus.).
16. Travush V.I., Sharipov R.Sh., Volkov Yu.S. On the technical regulation of the construction process. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2021; 4(606):3-7. EDN OOKDBU. (rus.).
17. Fedotov I.O., Sivenkov A.B. Problems and prospects of using flame retardants for wooden structures. *Problems of Technosphere Safety : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists*. 2021; 10:65-69. EDN TVLHUQ. (rus.).
18. Kluy V.V., Kosenko D.V., Bondarenko D.S. About passive fire protection at underground facilities of the mineral resource complex. *Natural and Technogenic Risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2020; 3(35):26-29. EDN HJDSGK. (rus.).
19. Gravit M.V., Yuminova M.O., Simonenko Ya.B. SBI method for determining fire-technical characteristics of wooden constructions with fireproof varnishes. *Fire and Emergency Safety : proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 370th anniversary of the Russian Fire Service*. 2019; 25-31. EDN PWPGP. (rus.).
20. Gerasimovich A.A., Agafonov S.A. Structural systems of multi-storey buildings based on glued wooden structures. *Master's Herald*. 2020; 5-5:30. EDN QNEUMV. (rus.).
21. Le T.D.H., Tsai M.-T. Experimental assessment of the fire resistance mechanisms of timber-steel composites. *Materials*. 2019; 12(23):4003. DOI: 10.3390/ma12234003
22. Auclair S.C., Sorelli L., Salenikovich A. Simplified nonlinear model for timber-concrete composite beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016; 117:30-42. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.07.019
23. Shahnewaz M., Dickof C., Tannert T. Bending performance of timber-timber composite floors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 511-517. DOI: 10.1007/978-981-19-0656-5\_43

24. Gower P. *Timber towers*. URL: <https://ww3.rics.org/uk/en/modus/built-environment/construction/timber-towers.html>

25. Bhandari S., Jahedi S., Riggio M., Muszynski L., Luo Z., Polastri A. CLT modular low-rise buildings: a DFMA approach for deployable structures using low-grade timber. *World Conference in Timber Engineering : conference*. 2021.

26. Kurmanov A.S., Kurmanov K.S., Kurmanova E.V. *Guide to building houses using SIP technology*. St. Petersburg, 2020; 184. (rus.).

27. Korol' E.A., Zhuravleva A.A. Influence of energy consumers' work during the construction of low-rise residential buildings on the environment. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 3:108-114. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-108-114. EDN LBPFCL. (rus.).

*Received March 9, 2023.*

*Adopted in revised form on April 26, 2023.*

*Approved for publication on June 6, 2023.*

**BIONOTES:** **Sergei A. Agafonov** — Assistant of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 7944-9351, ResearcherID: HHM-5486-2022, ORCID: 0000-0001-5742-8532, ScholarID: sBe\_I2AAAAAJ; agafonov\_sa@spbstu.ru;

**Vladimir A. Volkodav** — General Director; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24 build. 2A, 58 Riga prospect, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RSCI: 7902-1318; vva@niccps.ru;

**Ivan A. Volkodav** — Candidate of Technical Sciences, Science Director; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24 build. 2A, 58 Riga prospect, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RSCI: 1140-1800; via@niccps.ru;

**Irina D. Titova** — engineer-designer; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24 build. 2A, 58 Riga prospect, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; SPIN-code: 8288-6627; tid@niccps.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика

Дмитрий Рудольфович Низин<sup>1</sup>, Татьяна Анатольевна Низина<sup>1</sup>,  
Анна Викторовна Марьянова<sup>1</sup>, Евгений Борисович Миронов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва  
(МГУ им. Н.П. Огарева); г. Саранск, Россия;

<sup>2</sup> Инжиниринговый центр волоконной оптики; г. Саранск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Аддитивный способ изготовления предполагает возникновение у конечного изделия эмерджентных свойств, не присущих исходным элементам системы по отдельности. Эксплуатационные свойства изделий, полученных методом FDM-печати, начинают определяться не только свойствами используемого материала, но и параметрами печати — температурой сопла и стола, толщиной слоя, скоростью печати, направлением укладки слоев, их взаимным расположением и т.д. Таким образом, при проектировании 3D-печатных полимерных изделий с необходимыми характеристиками следует рассматривать систему «материал – параметры печати» совместно. Представлены результаты исследования влияния сорбционных показателей 3D-печатных образцов PETG-пластика, изготовленных методом FDM-печати, на их упруго-прочностные показатели.

**Материалы и методы.** Исследовались три группы 3D-печатных образцов PETG-пластика, изготовленных методом FDM-печати. Сбор, предобработка, анализ, статистическая обработка и визуализация полученных данных выполнены на языке программирования Python в интерактивной среде разработки Jupyter Notebook.

**Результаты.** Установлено, что влагосодержание 3D-печатных полимерных образцов может быть условно разделено на надструктурный и микроструктурный уровни. Сравнение предельных значений влагосодержания в различных условиях влагонасыщения показало, что первый уровень превосходит последний в 2–6 раз в зависимости от параметров печати образцов. Влагосодержание надструктурного уровня не оказывает статистически значимого (для  $\alpha = 0,01$ ) влияния на предел прочности образцов при растяжении, вне зависимости от параметров печати образцов. Влага, сорбированная надструктурным уровнем, предположительно, может выступать в качестве концентратора напряжений, препятствуя свободному течению образцов за границей предела прочности, что отражается в снижении показателя относительного удлинения при разрыве.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют учитывать влияние влажностного состояния на упруго-прочностные свойства 3D-печатных изделий и конструкций на основе PETG-пластиков. Это, в свою очередь, способствует повышению точности прогнозирования их поведения в реальных условиях эксплуатации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** FDM-печать, PETG-пластик, влагосодержание, надструктура, микроструктура, влагонасыщенное состояние

*Благодарности.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00206 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00206/>).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1078–1088. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1078-1088

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Рудольфович Низин, nizindi@yandex.ru.

## Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic samples

Dmitriy R. Nizin<sup>1</sup>, Tat'yana A. Nizina<sup>1</sup>, Anna V. Mar'yanova<sup>1</sup>, Evgenij B. Mironov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Engineering Center of Fiber Optics; Saransk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The additive manufacturing method implies the emergence of emergent properties in the final product, not inherent in the original elements of the system individually. Performance properties of products obtained by FDM-printing are defined not only by the material properties, but also by printing parameters — nozzle and table temperature, layer thickness, printing speed, the direction of laying layers, their relative positioning, etc. Thus, when designing 3D-printed polymer products with the required characteristics one should consider the material – printing parameters system together. The results of the study of the effect of sorption characteristics of 3D-printed PETG plastic samples made by FDM-printing on their elastic-strength properties are presented.

**Materials and methods.** Three groups of FDM-printed PETG 3D specimens were studied. Collection, preprocessing, analysis, statistical processing and visualization of the data were performed using Python programming language in an interactive Jupyter Notebook development environment.

**Results.** It was found that the moisture content of 3D-printed polymer samples could be conventionally divided into the superstructural and microstructural levels. A comparison of moisture content limits in different moisture saturation conditions shows that the former exceeds the latter by 2 to 6 times depending on the specimen printing parameters. Moisture content of superstructure level has no statistically significant (for  $\alpha = 0.01$ ) effect on the ultimate tensile strength of the samples, regardless of the printing parameters of the samples. The moisture sorbed by the level of substructure presumably can act as a stress concentrator preventing the free flow of specimens beyond the ultimate tensile strength, which is reflected in the reduction of elongation at rupture.

**Conclusions.** The obtained results allow taking into account the influence of moisture state on the elastic-strength properties of 3D printed articles and structures on the basis of PETG-plastics. This, in its turn, contributes to more accurate prediction of their behavior under real operating conditions.

**KEYWORDS:** FDM printing, PETG plastic, moisture content, superstructure, microstructure, moisture saturated state

**Acknowledgements.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00206 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00206/>).

**FOR CITATION:** Nizin D.R., Nizina T.A., Mar'yanova A.V., Mironov E.B. Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic samples. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(7):1078-1088. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1078-1088 (rus.).

*Corresponding author:* Dmitrij R. Nizin, [nizindi@yandex.ru](mailto:nizindi@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий большое распространение получили аддитивные технологии для изготовления изделий и конструкций различного функционального назначения. Наиболее широко данный способ применяется в медицине [1–3], аэрокосмической, авиационной и автомобильной промышленности [4–7], электротехнике [8, 9], строительной отрасли [10–16].

В строительстве в качестве материалов для печати изделий и конструкций используют составы на основе минеральных вяжущих [10–13], металлы [14], а также полимерные связующие [15, 16]. Несмотря на все преимущества аддитивного подхода, для внедрения изготовленных таким способом изделий в практику реального строительства необходимо обеспечить их соответствие полному перечню требований, в особенности по долговечности.

Аддитивный способ изготовления, вне зависимости от используемого материала, предполагает возникновение у конечного изделия эмерджентных свойств, не присущих элементам системы по отдельности. Так, эксплуатационные характеристики изделий, полученных методом FDM-печати, складываются не только из свойств исходного материала, но также и из параметров печати — температуры сопла и стола, толщины слоя, скорости печати, направления укладки слоев, их взаимного расположения и т.д. [17]. Таким образом, при проектировании 3D-печатных полимерных изделий с заданными характеристиками следует рассматривать систему «материал – параметры печати» целиком.

Как известно, влажностное состояние полимерных материалов (ПМ), в том числе применяемых при изготовлении композитных изделий и конструкций, оказывает существенное влияние на их эксплуатационные показатели. Предел прочности при растяжении эпоксидных полимеров, а также композитов на их основе, может снижаться до 50 %

во влагонасыщенном состоянии [18–21]. В некоторых случаях влагонасыщение ПМ сопровождается не только кратным снижением прочностных показателей, но и изменением характера разрушения исследуемых образцов с хрупкого на вязкотекучий [20]. Предполагается, что гетерогенность структуры 3D-печатных полимерных изделий найдет свое отражение в особенностях протекания процессов сорбции и десорбции влаги. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния сорбционных показателей 3D-печатных образцов PETG-пластика (полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем), изготовленных методом FDM-печати, на их упруго-прочностные характеристики.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались три группы образцов, различающихся направлением укладки слоев при печати (рис. 1) — горизонтальное (серия 261), вертикальное (серия 262) и боковое (серия 263). Параметры печати образцов представлены в табл. 1. Печать осуществлялась на 3D-принтере FlyingBear Ghost 5 филаментом на основе PETG-пластика. Форма изготавливаемых при печати образцов соответствовала образцам-восьмеркам (тип 2) по ГОСТ 11262–2017.

**Табл. 1.** Параметры печати образцов

**Table 1.** Sample print options

Высота слоя, мм Layer height, mm	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Температура сопла, °C Nozzle temperature, °C	Температура стола, °C Table temperature, °C	Скорость печати, мм/с Print speed, mm/s
0,2	1,6	245	70	30

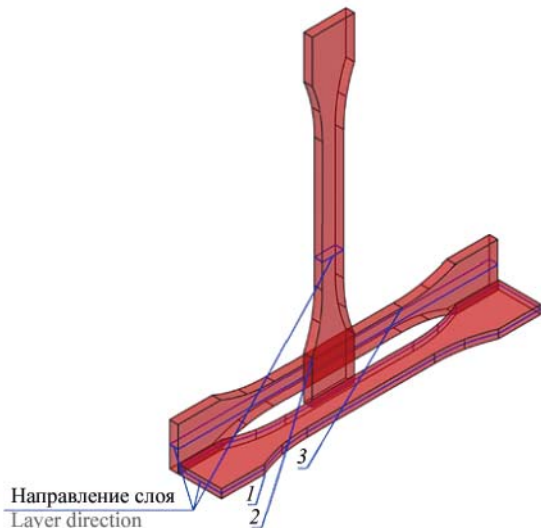


Рис. 1. Ориентация образцов в процессе печати: 1 — горизонтальная (серия 261); 2 — вертикальная (серия 262); 3 — боковая (серия 263)

Fig. 1. Sample orientation during printing: 1 — horizontal (series 261); 2 — vertical (series 262); 3 — side (series 263)

В каждой серии одновременно экспонировалось и впоследствии испытывалось не менее шести образцов. Температура экспонирования в обоих случаях поддерживалась на уровне  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Образцы заявленных серий влагонасыщались в следующих условиях:

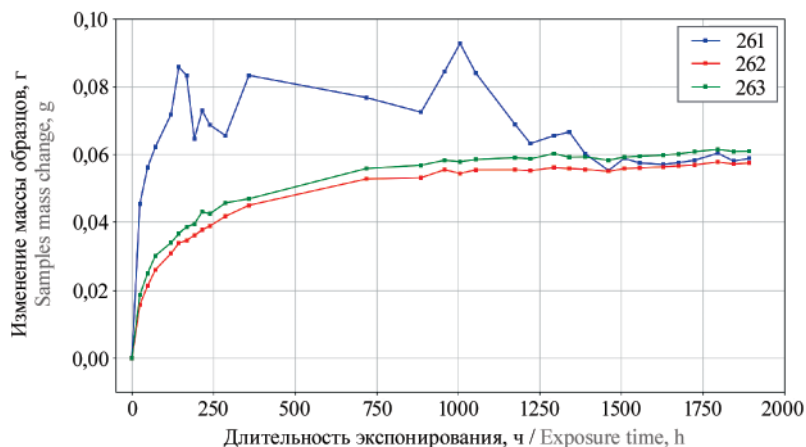
- в эксикаторе над дистиллированной водой (далее на рисунках — above);
- в эксикаторе с полным погружением в дистиллированную воду (далее на рисунках — immersion).

Сбор, предобработка, анализ, статистическая проверка и визуализация выполнены на языке программирования Python в интерактивной среде разработки Jupyter Notebook.

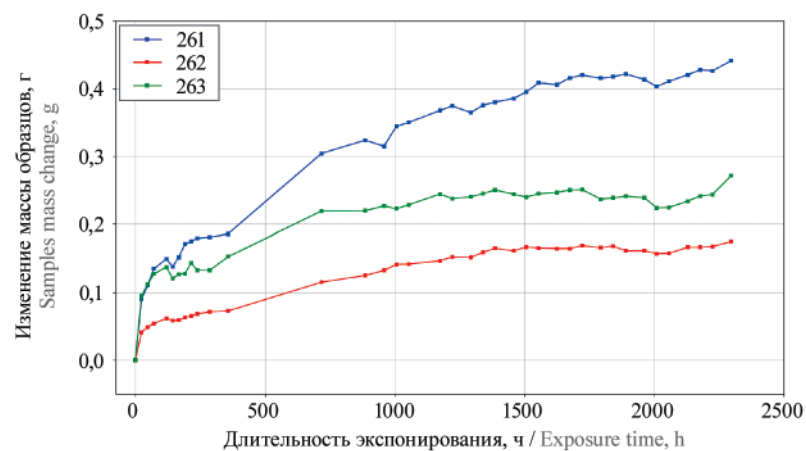
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены кривые средних значений изменения массы образцов над поверхностью воды (рис. 2, a) и с полным погружением (рис. 2, b).

Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу относительно различия в характере протекания процессов влагонасыщения 3D-печатных



a



b

Рис. 2. Изменение массы образцов при экспонировании над поверхностью воды (a) и с полным погружением (b)  
Fig. 2. Samples mass change exposed above the water surface (a) and with complete immersion (b)

полимерных образцов над поверхностью воды и с полным погружением. В случае экспонирования образцов над поверхностью воды основной вклад в результирующее значение влагосодержания, вероятно, вносят изменения, происходящие на уровне микроструктуры материала образцов, что по своей сути близко к типичному процессу влагонасыщения ПМ. В свою очередь, для образцов, полностью погружаемых в воду, наибольший вклад в суммарное изменение влагосодержания вносит надструктура. Это проявляется в том, что для достижения идентичных изменений массы образцам над поверхностью воды потребовалось порядка 1000–1500 ч, в то время как образцам, погруженным в воду, — от 24 до 120 ч в зависимости от серии. В качестве факта, подтверждающего сформулированную гипотезу, также следует рассматривать относительное равенство средних количественных значений предельного влагонасыщения образцов, полученных для всех исследуемых серий (рис. 2, а). Это позволяет утверждать, что в случае экспонирования образцов над поверхностью воды параметры печати не оказывают значимого влияния на предельное значение влагонасыщения образцов. Установление возможных причин отличия формы кривой изменения влагосодержания образцов серии 261 при экспонировании над поверхностью воды (рис. 2, а) требует проведения дополнительных исследований.

На рис. 3 приведены количественные значения предельного влагосодержания образцов в зависимости от условий экспонирования. Согласно полученным данным, вклад надструктуры образцов, являющейся непосредственным отражением параметров их печати (в частности, направления укладки слоев), существенно выше вклада микро-

структуры. Так, в зависимости от исследуемой серии, разница во влагосодержании на различных уровнях составила от двух (серия 262) до шести раз (серия 261).

На рис. 4 показаны диаграммы деформирования 3D-печатных полимерных образцов в зависимости от серии и условий экспонирования. Средние значения упруго-прочностных показателей исследуемых образцов — предела прочности при растяжении, относительного удлинения при максимальной нагрузке, предела прочности при разрыве, а также относительного удлинения при разрыве в зависимости от условий экспонирования приведены в табл. 2. Распределение значений упруго-прочностных показателей исследуемых составов в зависимости от условий экспонирования показано на рис. 5.

В табл. 3 представлены результаты статистической проверки гипотезы о равенстве средних двух распределений, полученных для образцов, экспонированных над поверхностью воды и с погружением соответственно. Согласно полученным результатам, для уровня статистической значимости  $\alpha = 0,01$  неслучайным можно принять расхождение только для показателей относительного удлинения при максимальной нагрузке и разрыве образцов серии 262. Однако, учитывая тот факт, что все образцы серии 262 (вне зависимости от условий экспонирования) разрушились хрупко, данные показатели по своей сути идентичны. Достаточно близким к уровню статистической значимости оказалось  $p$ -значение для показателя относительного удлинения при разрыве образцов серии 263. В остальных случаях вероятность равенства средних значений распределений, полученных для различных условий экспонирования, варьируется в диапазоне от 6 до 95 %.

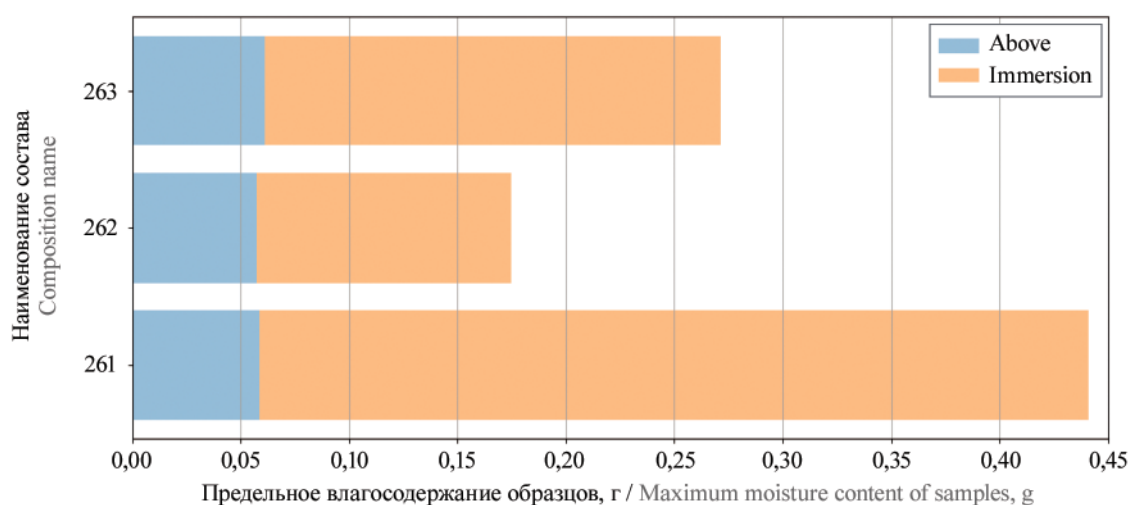


Рис. 3. Гистограммы предельного влагосодержания образцов в зависимости от условий экспонирования (above — над поверхностью воды, immersion — с погружением)

Fig. 3. Histograms of the maximum moisture content of samples depending on the exposure conditions (above the water surface, with immersion)

Табл. 2. Средние значения параметров кривых деформирования образцов исследуемых серий в зависимости от условий экспонирования

Table 2. Average parameter values of the deformation curves of the studied series samples depending on the exposure conditions

Исследуемые показатели Researched indicators	Номер серии Series number		
	261	262	263
Предел прочности при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	30,7/32,8	18,4/15,9	42,6/42,5
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, % Relative elongation at maximum load, %	3,18/3,17	1,49/1,10	3,71/3,63
Предел прочности при разрыве, МПа Tensile strength at break, MPa	23,4/27,0	18,4/15,8	2,29/7,56
Относительное удлинение при разрыве, % Relative elongation at break, %	5,08/5,16	1,50/1,10	86,14/21,96

Примечание: в числителе приведены значения, полученные для образцов, экспонированных над поверхностью воды; в знаменателе — с погружением.

Note: The numerator shows the values obtained for samples exposed above the water surface; the denominator shows the values with immersion.

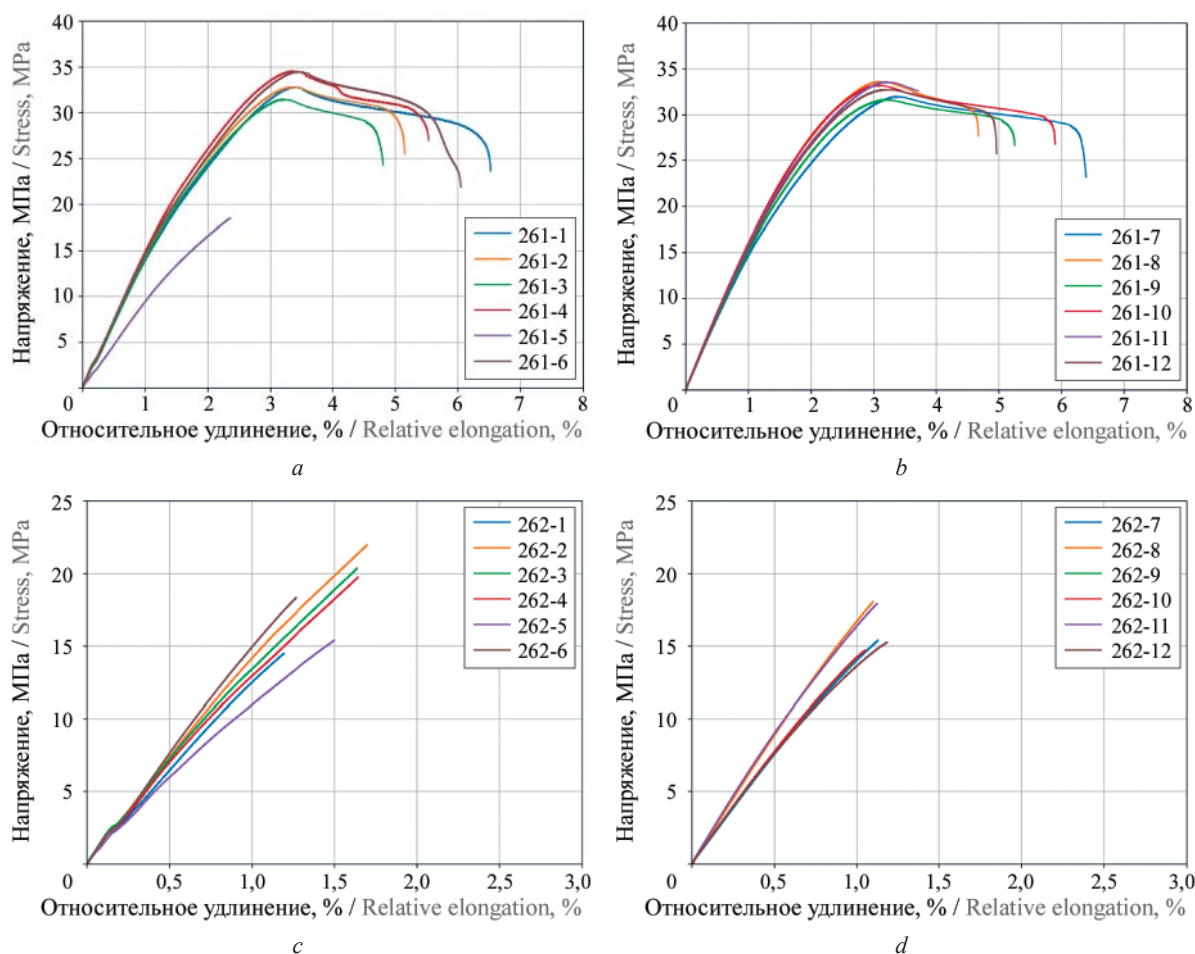


Рис. 4. (начало) Кривые деформирования образцов серий 261 (a, b) и 262 (c, d) в зависимости от условий экспонирования (a, c, d — над поверхностью воды; b, e, f — с погружением)

Fig. 4. (beginning) Deformation curves of sample series 261 (a, b) and 262 (c, d) depending on exposure conditions (a, c, d — above the water surface, b, e, f — with immersion)

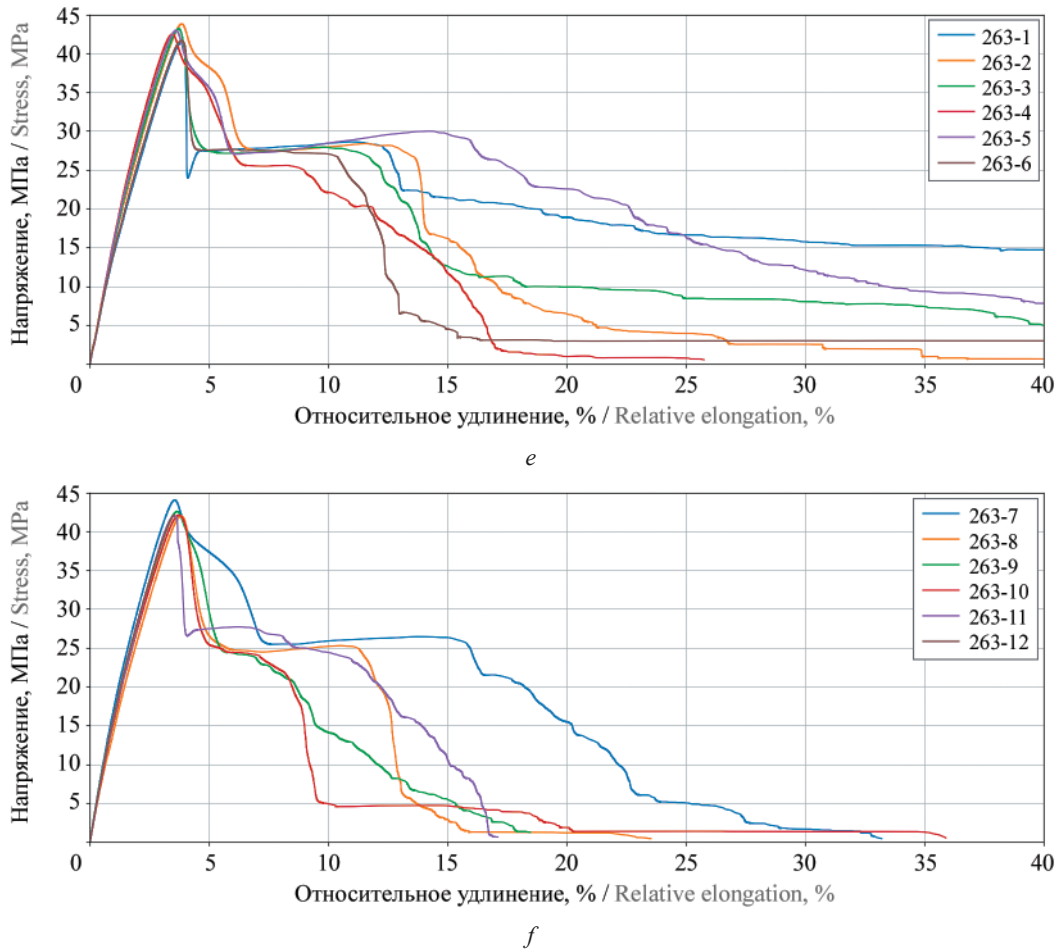


Рис. 4. (окончание) Кривые деформирования образцов серий 263 (*e, f*) в зависимости от условий экспонирования (*a, c, d* — над поверхностью воды; *b, e, f* — с погружением)

Fig. 4. (ending) Deformation curves of sample series 263 (*e, f*) depending on exposure conditions (*a, c, d* — above the water surface, *b, e, f* — with immersion))

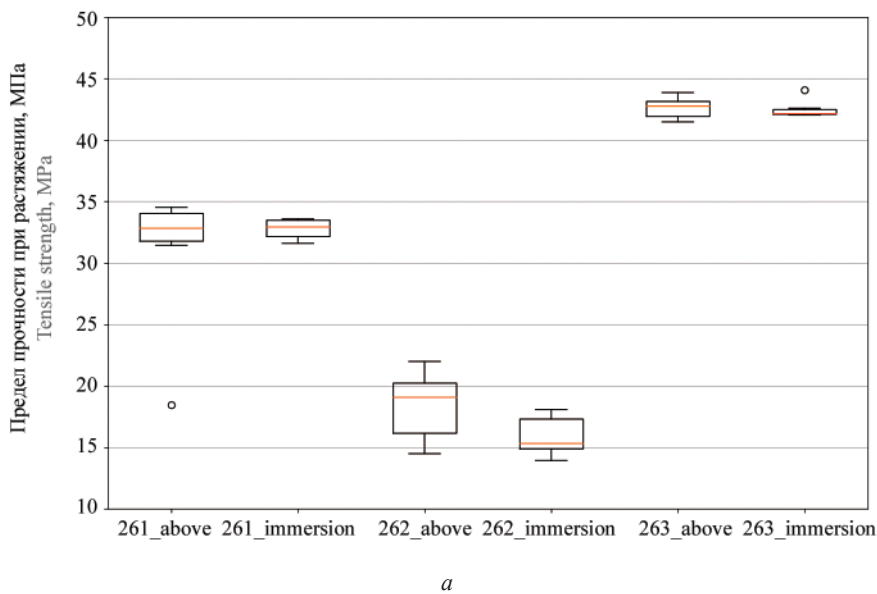
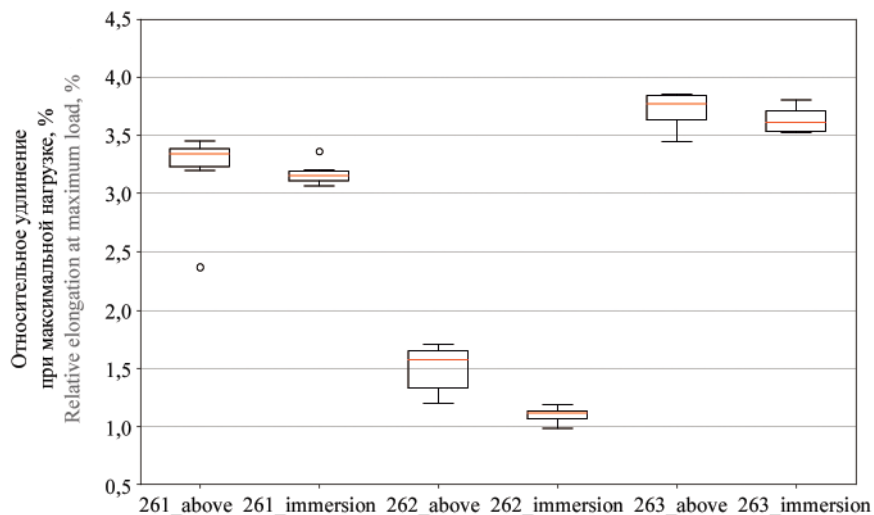
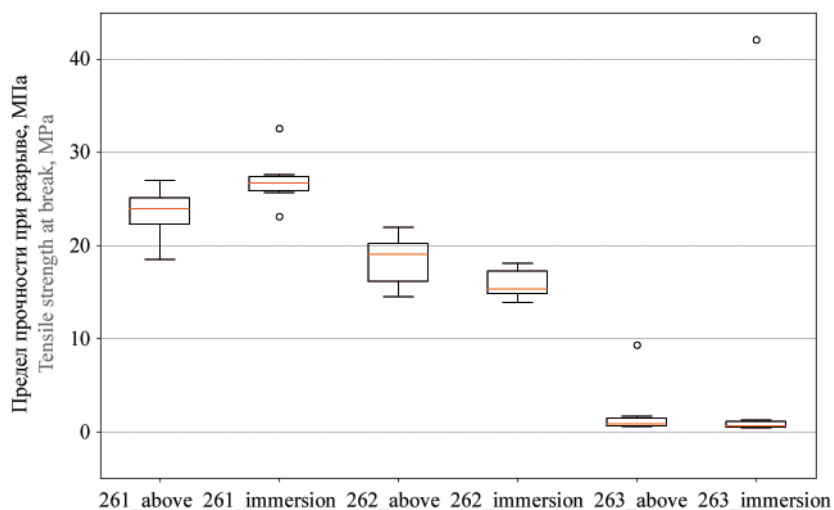


Рис. 5. (начало) Диаграммы распределения значений предела прочности при растяжении (*a*) в зависимости от условий экспонирования

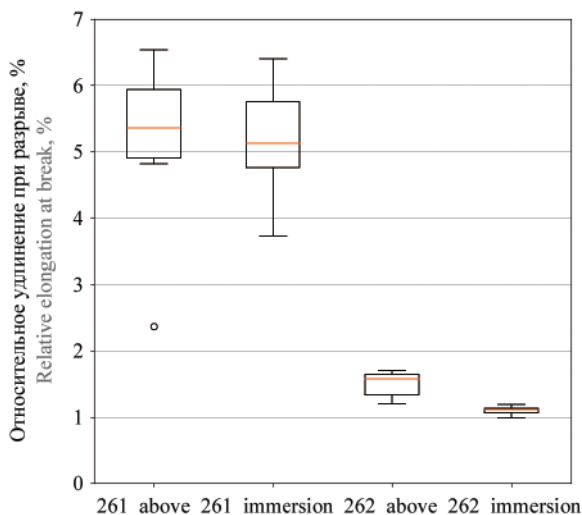
Fig. 5. (beginning) Value distribution charts of tensile strength (*a*) depending on the exposure conditions



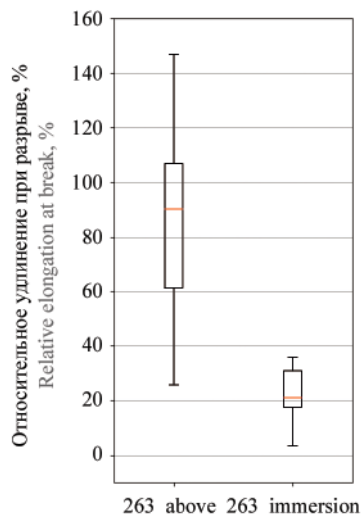
b



c



d



e

Рис. 5. (окончание) Диаграммы распределения относительного удлинения при максимальной нагрузке (b), предела прочности при разрыве (c) и относительного удлинения при разрыве (d, e) в зависимости от условий экспонирования  
 Fig. 5. (ending) Value distribution relative elongation at maximum load (b), tensile strength at break (c) and relative elongation at break (d, e) depending on the exposure conditions

**Табл. 3.** Вероятность ( $p$ -value) равенства средних значений двух распределений, полученных для различных условий экспонирования**Table 3.** Probability ( $p$ -value) of equality of the two distributions mean obtained for different exposure conditions

Номер серии Series number	Исследуемые показатели Researched indicators			
	Предел прочности при растяжении Tensile strength	Относительное удлинение при максимальной нагрузке Relative elongation at maximum load	Предел прочности при разрыве Tensile strength at break	Относительное удлинение при разрыве Relative elongation at break
261	0,4595	0,9570	0,0662	0,9114
262	0,1066	0,0049	0,1071	0,0049
263	0,8118	0,3405	0,4859	0,0133

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Влагосодержание 3D-печатных полимерных образцов может быть условно разделено на влагосодержание уровней микро- и надструктуры. Уровень надструктуры характеризуется существенно большим вкладом в суммарное значение предельного влагосодержания 3D-печатных полимерных образцов по сравнению с микроструктурным уровнем. Для исследованных серий образцов PETG-пластика отношение вклада надструктуры к вкладу микроструктуры составило от двух до шести раз в зависимости от направления укладки слоев при печати.

Влага, сорбированная надструктурным уровнем 3D-печатных образцов PETG-пластика, не оказывает статистически значимого влияния на показатель предела прочности при растяжении. Статистически значимые изменения зафиксированы для показателя относительного удлинения при максимальной нагрузке (при разрыве) для образцов серии 262. Зафиксировано снижение данного показателя более чем на 25 %.

Результат, близкий к выбранному уровню статистической значимости  $\alpha = 0,01$ , получен для относительного удлинения при разрыве образцов серии 263. Установлено, что разрыв образцов данной серии происходит при значениях относительного удлинения, превосходящих значения, полученные для других серий более чем на порядок. Так, среднее значение данного показателя составило 86 и 21 % для образцов серии 263, экспонированных над водой и с погружением соответственно.

Можно предположить, что влага, сорбированная надструктурным уровнем образцов серии 263, выступала в роли концентраторов напряжений вследствие возникновения сжимающих пуассоновских сил в области шейки и препятствовала свободному течению материала образца за границей предела прочности.

Несмотря на отсутствие статистически значимого прямого влияния влагосодержания надструктурного уровня 3D-печатных полимерных образцов на их механическую прочность, можно предположить возможные пути его косвенного влияния на эксплуатационные показатели полимерных изделий. Во-первых, свободная влага надструктурного уровня 3D-печатных полимерных изделий при замораживании может приводить к повышению внутренних напряжений и возникновению внутренних дефектов. Во-вторых, регулярная надструктура 3D-печатных полимерных изделий может приводить к более равномерному распределению влаги по объему материала и, как следствие, ускорению и более равномерному протеканию процессов температурно-влажностного старения, выступающих в качестве основного источника снижения эксплуатационных показателей ПМ. В-третьих, высокая скорость сорбционно-десорбционных процессов, характеризующая надструктурный уровень, может привести к существенному увеличению доли необратимых потерь массы полимерных изделий вследствие интенсификации процессов влаго- и массопереноса, особенно в условиях натурального климатического старения.

Все озвученные гипотезы требуют проведения дополнительных исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dawood A., Marti B., Sauret-Jackson V., Darwood A. 3D printing in dentistry // *British Dental Journal*. 2015. Vol. 219. Issue 11. Pp. 521–529. DOI: 10.1038/sj.bdj.2015.914

2. Liaw C.Y., Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine // *Biofabrication*. 2017. Vol. 9. Issue 2. P. 024102. DOI: 10.1088/1758-5090/aa7279

3. Kalaskar D.M. 3D printing in medicine. Woodhead Publishing, 2017. 234 p.
4. Joshi S.C., Sheikh A.A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability // *Virtual and Physical Prototyping*. 2015. Vol. 10. Issue 4. Pp. 175–185. DOI: 10.1080/17452759.2015.1111519
5. Schiller G.J. Additive manufacturing for Aerospace // 2015 IEEE Aerospace Conference. 2015. DOI: 10.1109/AERO.2015.7118958
6. Sarvankar S.G., Yewale S.N. Additive manufacturing in automobile industry // *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 4. Pp. 1–10.
7. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 35. Pp. 1286–1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
8. Yin X.-Y., Zhang Y., Cai X., Guo Q., Yang J., Wang Z.L. 3D printing of ionic conductors for high-sensitivity wearable sensors // *Materials Horizons*. 2019. Vol. 6. Issue 4. Pp. 767–780. DOI: 10.1039/C8MH01398E
9. Hirsch A., Dejace L., Michaud H.O., Lacour S.P. Harnessing the rheological properties of liquid metals to shape soft electronic conductors for wearable applications // *Accounts of Chemical Research*. 2019. Vol. 52. Issue 3. Pp. 534–544. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00489
10. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
11. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 25–36. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001
12. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J.M., Sallet T.A.M. 3D printing concrete with reinforcement // *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. 2018. Pp. 2484–2493. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2\_283
13. Xiao J., Ji G., Zhang Y., Ma G., Mechtcherine V., Pan J. et al. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. P. 104115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
14. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction : A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. Pp. 332–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045
15. Hmeidat N.S., Kemp J.W., Compton B.G. High-strength epoxy nanocomposites for 3D printing // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 160. Pp. 9–20. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.008
16. Wang B., Zhang Z., Pei Z., Qiu J., Wang S. Current progress on the 3D printing of thermosets // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2020. Vol. 3. Issue 4. Pp. 462–472. DOI: 10.1007/s42114-020-00183-z
17. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49
18. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов В.И. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5 (65). С. 110–118. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118
19. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A., Molokov M.V., Frolov A.S., Nizina T.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer Testing*. 2018. Vol. 65. Pp. 281–296. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.007
20. Selyaev V.P., Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S. Analysis of the moisture content effect on the specific index and damage accumulation kinetics in the structure of polymeric materials during natural climatic aging // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 99–108. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-99-108
21. Низина Т.А., Низин Д.Р., Канаева Н.С., Климентьева Д.А., Порватова А.А. Влияние влажностного состояния на кинетику накопления поврежденных в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 1 (16). С. 37–45. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_1\_37

Поступила в редакцию 10 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Рудольфович Низин** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва** (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 717473, Scopus: 57190172059, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0001-8762-5369; nizindi@yandex.ru;

**Татьяна Анатольевна Низина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций, советник РААСН; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: B-128-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238, nizinata@yandex.ru;

**Анна Викторовна Марьянова** — магистрант кафедры строительных конструкций Института архитектуры и строительства; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; martyanovaanna99@yandex.ru;

**Евгений Борисович Миронов** — специалист; **Инжиниринговый центр волоконной оптики**; 430030, г. Саранск, ул. Лодыгина, д. 3, стр. 1; mirovov.rm@mail.ru.

*Вклад авторов:*

*Низин Д.Р.* — развитие методологии исследования, обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблиц.

*Низина Т.А.* — научное руководство, методология исследования, редакция текстового материала.

*Марьянова А.В.* — проведение экспериментальных исследований, сбор материала.

*Миронов Е.Б.* — изготовление образцов.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Dawood A., Marti B., Sauret-Jackson V., Darwood A. 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*. 2015; 219(11):521-529. DOI: 10.1038/sj.bdj.2015.914
2. Liaw C.Y., Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication*. 2017; 9(2):024102. DOI: 10.1088/1758-5090/aa7279
3. Kalaskar D.M. *3D printing in medicine*. Woodhead Publishing, 2017; 234. (rus.).
4. Joshi S.C., Sheikh A.A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015; 10(4):175-185. DOI: 10.1080/17452759.2015.1111519
5. Schiller G.J. Additive manufacturing for Aerospace. *2015 IEEE Aerospace Conference*. 2015. DOI: 10.1109/AERO.2015.7118958
6. Sarvankar S.G., Yewale S.N. Additive manufacturing in automobile industry. *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*. 2019; 7(4):1-10.
7. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*. 2019; 35:1286-1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
8. Yin X.-Y., Zhang Y., Cai X., Guo Q., Yang J., Wang Z.L. 3D printing of ionic conductors for high-sensitivity wearable sensors. *Materials Horizons*. 2019; 6(4):767-780. DOI: 10.1039/C8MH01398E
9. Hirsch A., Dejace L., Michaud H.O., Lacour S.P. Harnessing the rheological properties of liquid metals to shape soft electronic conductors for wearable applications. *Accounts of Chemical Research*. 2019; 52(3):534-544. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00489
10. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
11. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:25-36. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001
12. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J.M., Sallet T.A.M. 3D printing concrete with reinforcement. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. 2018; 2484-2493. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2\_283
13. Xiao J., Ji G., Zhang Y., Ma G., Mechtcherine V., Pan J. et al. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 122:104115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
14. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction : a review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*. 2019; 180:332-348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045
15. Hmeidat N.S., Kemp J.W., Compton B.G. High-strength epoxy nanocomposites for 3D printing. *Composites Science and Technology*. 2018; 160:9-20. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.008
16. Wang B., Zhang Z., Pei Z., Qiu J., Wang S. Current progress on the 3D printing of thermosets. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2020; 3(4):462-472. DOI: 10.1007/s42114-020-00183-z

17. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Larionov S.A., Sorokin A.E. The influence of technological modes on FDM printing and the composition of materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review). *Proceedings of VIAM*. 2019; 10(82):34-49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49 (rus.).

18. Startsev V.O., Plotnikov V.I., Antipov Yu.V. Reversible influence of moisture on the mechanical properties of PCM after weathering. *Proceedings of VIAM*. 2018; 5(65):110-118. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118 (rus.).

19. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A., Molokov M.V., Frolov A.S., Nizina T.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer Test-*

*ing*. 2018; 65:281-296. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.007

20. Selyaev V.P., Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S. Analysis of the moisture content effect on the specific index and damage accumulation kinetics in the structure of polymeric materials during natural climatic aging. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):99-108. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-99-108

21. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Klimentyeva D.A., Porvatova A.A. Influence of the humidity state on the kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples under the action of tensile stresses. *Expert: Theory and Practice*. 2022; 1(16):37-45. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_1\_37 (rus.).

Received March 10, 2023.

Adopted in revised form on May 2, 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES:** **Dmitrij R. Nizin** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Building Technologies and Expertise; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 717473, Scopus: 57190172059, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0001-8762-5369; nizindi@yandex.ru;

**Tat'yana A. Nizina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Advisor to the RAACS; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: V-128-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238; nizinata@yandex.ru;

**Anna V. Mar'yanova** — undergraduate of the Department of Building Structures of the Institute of Architecture and Construction; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; martyanovaanna99@yandex.ru;

**Evgenij B. Mironov** — specialist; **Engineering Center of Fiber Optics**; build. 1, 3 Lodygina st., Saransk, 430030, Russian Federation; mironov.rm@mail.ru.

*Authors' contribution:*

*Dmitrij R. Nizin* — development of the research methodology, processing of the material, writing the source text, creating illustrations and tables.

*Tat'yana A. Nizina* — scientific guidance, research methodology, editing of text material.

*Anna V. Mar'yanova* — conducting experimental studies, collecting material.

*Evgenij B. Mironov* — technical support in the manufacture of samples.

*The authors declare no conflict of interest.*

# БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.544

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1089-1103

## Прогнозирование и ликвидация загрязнений в экосистемах, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями

Константин Львович Чертес, Алексей Александрович Букин,  
Николай Сергеевич Бухман, Виталий Николаевич Пыстин,  
Артём Петрович Сеяно, Ольга Владимировна Тупицына

*Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Предложены принципы прогнозирования и ликвидации последствий загрязнений, сформированных выведенными из эксплуатации накопителями гетерофазных коммунальных и промышленных отходов, при помощи высоконапорной промывки. Основными решаемыми задачами являются разработка параметров оценки шламонакопителей и моделирование потоков загрязнений в геосредах с неоднородными фильтрационно-реологическими характеристиками с использованием предлагаемых критериев прогнозирования.

**Материалы и методы.** За основу прогнозирования принята модель массопереноса загрязнений в геосреде с позиций законов теории фильтрации и электростатики. Закономерности теории фильтрации (закон Дарси) положены в основу транспорта «чистых» жидкостей (истинных растворов) через «идеальные» пористые среды. Закономерности электростатики положены в основу массопереноса вязких потоков загрязнений во фрагментах геосреды, обладающих неоднородным сопротивлением. Проведен промышленный эксперимент по высоконапорной промывке геосреды растворами флокулянтов для ликвидации загрязнений, сформированных выведенным из эксплуатации накопителем опасных отходов.

**Результаты.** Изучены фильтрационные и реологические свойства шламов и загрязненной геосреды. Разработаны математические модели фильтрации загрязненной жидкости в геосреду из шламовых тел. Представлены ключевые зависимости изменения фильтрационно-реологических характеристик загрязненной геосреды от величин давления нагнетания раствора и траектории прогнозного радиуса загрязнения.

**Выводы.** По результатам промышленных исследований разработан способ высоконапорной реагентной промывки пород зоны аэрации от загрязнений органической и минеральной природы, содержащихся в инфильтратах на основе жидкостей различной вязкости. Выявлена гидродинамическая связь между поглощающей и добывающими скважинами в условиях опытных участков очищаемой геосреды. Предлагаемые методы прогнозирования и ликвидации загрязнений могут быть применены в проектах ликвидации объектов накопленного экологического вреда, сформированных бездействующими накопителями шламовых отходов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геосреда загрязненная, шламонакопитель, объект накопленного экологического вреда, экосистемы природно-техногенные, промывка высоконапорная, прогнозирование потока, вязкость, рабочие растворы реагентов

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чертес К.Л., Букин А.А., Бухман Н.С., Пыстин В.Н., Сеяно А.П., Тупицына О.В. Прогнозирование и ликвидация загрязнений в экосистемах, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителем // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1089–1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1089-1103

Автор, ответственный за переписку: Алексей Александрович Букин, alkatras\_b@mail.ru.

## Prediction and elimination of pollution in ecosystems formed by decommissioned sludge reservoirs

Konstantin L. Chertes, Aleksey A. Bukin, Nikolai S. Bukhman, Vitaliy N. Pystin,  
Artem P. Seyanko, Olga V. Tupitsyna

*Samara State Technical University (SSTU); Samara, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The principles of forecasting and eliminating the consequences of pollution formed by decommissioned accumulators of heterophase municipal and industrial waste by means of high-pressure washing are proposed. The main tasks to be solved are the development of sludge accumulator assessment parameters and modelling pollution flows in geoenvironments with heterogeneous filtration and rheological characteristics using the proposed prediction criteria.

**Materials and methods.** The prediction is based on the model of mass transfer of pollution in the geo-environment from the standpoint of the laws of the theory of filtration and electrostatics. The regularities of the theory of filtration (Darcy's Law) form the basis for the transport of "pure" liquids (true solutions) through "ideal" porous media. The regularities of electrostatics form the basis for the mass transfer of viscous pollution flows in fragments of the geo-environment with non-uniform resistance. An industrial experiment was carried out on high-pressure flushing of the geo-environment with flocculant solutions to eliminate pollution formed by a decommissioned hazardous waste storage facility.

**Results.** Filtration and rheological properties of sludge and polluted geo-environment have been studied. Mathematical models of contaminated liquid filtration into the geo-environment from sludge bodies have been developed. The main dependences of the change in the filtration-rheological characteristics of the polluted geo-environment on the values of the solution injection pressure and the trajectory of the predicted radius of pollution are presented.

**Conclusions.** According to the results of industrial research the method of high-pressure reagent washing of rocks of aeration zone from pollution of organic and mineral nature contained in infiltrates based on liquids of various viscosities has been developed. The hydrodynamic connection between absorbing and producing wells was revealed in the conditions of experimental areas of the cleaned geo-environment. The proposed methods for forecasting and eliminating pollution can be applied in projects for the elimination of objects of accumulated environmental damage formed by inactive sludge waste storage tanks.

**KEYWORDS:** polluted geo-environment, sludge accumulator, object of accumulated environmental damage, natural-technogenic ecosystems, high-pressure flushing, flow prediction, viscosity, working solutions of reagents

**FOR CITATION:** Chertes K.L., Bukin A.A., Bukhman N.S., Pystin V.N., Seyanko A.P., Tupitsyna O.V. Prediction and elimination of pollution in ecosystems formed by decommissioned sludge reservoirs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1089-1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1089-1103 (rus.).

*Corresponding author:* Alexey A. Bukin, alkatras\_b@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Длительный период времени основным способом обращения с гетерофазными коммунальными и промышленными отходами было их размещение в шламонакопителях.

Выведенные из эксплуатации шламонакопители в ряде случаев представляют собой объекты накопленного экологического вреда (ОНЭВ) и подлежат ликвидации<sup>1</sup>. Выбор и обоснование направлений ликвидации требует прогнозирования состояния шламонакопителей как природно-техногенных экосистем (ПТЭ). Природным элементом здесь выступает загрязненная геосреда в составе пород зоны аэрации, подземных вод и водоисточников области разгрузки; техногенными элементами — шламовые тела и загрязненные инфильтраты из шламовых тел, поступающие в геосреду.

Ликвидация шламовых тел достаточно изучена и связана с применением открытых методов экскавации отходов, их химического, биохимического или термического обезвреживания [1, 2–4]. Устранение загрязнения геосреды на глубинах пород зоны аэрации сопряжено с использованием закрытых методов: пропарки, промывки, реагентной очистки грунтов через сети вертикальных и наклонных скважин [5, 6].

Промывка геосреды сопровождается переводом «защемленных» и сорбированных в порах грунта загрязнений в свободное состояние с последующим оттоком в дренаж, сбором загрязненной жидкости, ее подъемом на поверхность и очисткой.

Известно, что в старых накопителях наряду с коммунальными отходами неорганизованно раз-

мещали промышленные отходы. Примеры совместного расположения в накопителях осадков сточных вод (ОСВ), осадков водоподготовки (ОВП) и шламов ряда химических производств приведены в существующей научно-практической литературе [7–11]. Данные отходы — это многокомпонентные гетерофазные системы, обладающие повышенными значениями динамического коэффициента вязкости ( $\mu \gg 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ). Инфильтраты из шламовых тел, сформированных вязкими отходами, представляют собой бингамовские, дилатантные и другие типы псевдопластичных неньютоновских жидкостей [12, 13]. Начиная с глубин более 10 м, очистить геосреду распространенными методами промывки и пропарки крайне затруднительно. Низкая проницаемость грунта, высокая вязкость жидких флюидов, заполняющих его поры, создают сопротивление потоку промывочных растворов и не позволяют им равномерно распределяться по всей толще породы от поверхности загрязненных грунтов до отметок водоупоров. Необходима разработка новых и адаптация имеющихся методов высоконапорной подачи промывочных жидкостей, способствующих наряду с очисткой геосреды от загрязнений изменению ее фильтрационно-реологических характеристик в сторону увеличения проницаемости и снижения вязкости.

Цель исследования — обоснование принципов и разработка методов прогнозирования и ликвидации последствий загрязнений ПТЭ, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями.

Для достижения поставленной цели решили следующие задачи:

1. Разработали параметры оценки бездействующих шламонакопителей, как элементов ПТЭ, для обоснования необходимости производства ликвидационных работ.

<sup>1</sup> Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.03.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2022).

2. Сформулировали критерии прогнозирования потоков загрязнений в ПТЭ, включающих шламовые тела, нарушенные породы зоны аэрации, подземные воды и водоисточники области их разгрузки.

3. Смоделировали потоки загрязнений в геосредах с неоднородными фильтрационно-реологическими характеристиками с использованием предлагаемых критериев прогнозирования.

4. Провели крупнотоннажный промышленный эксперимент по высоконапорной промывке геосреды от загрязнений с помощью методов, способствующих увеличению проницаемости пород и снижению вязкости распределенных в их порах жидких флюидов.

5. Разработали технологическую схему восстановления геосреды, нарушенной шламонакопителями, и ее эколого-экономическое обоснование.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе создания прогнозной модели массопереноса загрязнений в ПТЭ предлагается сочетание положений теории фильтрации и электростатики.

Закономерности теории фильтрации (закон Дарси) положены в основу транспорта «чистых» жидкостей (истинных растворов) через «идеальные» пористые среды [14]. Закономерности электростатики — в основу массопереноса вязких потоков загрязнений во фрагментах геосреды, обладающих неоднородным сопротивлением<sup>2</sup>.

Имеется опыт извлечения загрязнений из геосреды без нарушения ее сплошности путем подачи отмывающих растворов. Данный опыт использован для санации фрагментов нефтезагрязненных грунтов на глубине до 3 м [15, 16], при рекультивации земель, нарушенных массивами твердых коммунальных отходов (ТКО) [17], а также при извлечении вододисперсионного слоя накопителей пастообразных отходов нефтехимических предприятий для последующей подачи на канализационные очистные сооружения (КОС) биологической очистки сточных вод [18]. Однако указанные выше методы распространяются на подачу и извлечение из геосреды растворов на основе ньютоновских жидкостей под давлением не более 2,0 атм (~0,2 МПа). Значение динамической вязкости  $\mu$  в данных условиях составляет 0,1–2,0 мПа·с в грунтах с коэффициентом проницаемости геосреды  $K_{ге} \gg 10^{-8} \text{ м}^2$ . К ним относятся галечники, пески и другие легко фильтруемые породы [19].

Более сложной представляется закачка растворов реагентов в геосреду со значениями  $\mu$  в диапазоне 10–300 мПа·с, в труднофильтруемые фрагменты

геосреды с  $K_{ге} \ll 10^{-8} \text{ м}^2$ . К подобным фрагментам можно отнести труднофильтруемые глинисто- и сульфидно-подобные грунты, загрязненные к тому же тяжелыми углеводородами, полимерами или лигносульфонатами [20–22]. Фильтрационно-реологические параметры здесь соответствуют условиям ПТЭ, сформированной шламонакопителями. Соответственно, и давления закачки промывочных жидкостей в подобных средах должны быть значительно больше чем 2,0 атм (~0,2 МПа).

Эффект от высоконапорной подачи растворов в геосреду обусловлен возникновением явлений микрогидропоявления пласта с повышением его проницаемости и снижением вязкости загрязнений [23–25].

Перспективным направлением высоконапорной подачи растворов в труднофильтруемые породы на глубину более 10 м выступает струйная цементация [26–30]. Давление потока рабочих растворов, развиваемое экструдерами, составляет в данном методе более 100 атм (~10 МПа).

Струйная цементация предназначена для создания в грунтах вертикальных геозащитных завес глубиной более 10 м с использованием растворов, обладающих вязкими или охлаждающими свойствами [31–34]. Метод струйной цементации позволяет укреплять грунты по вертикали на всю доступную скважинной подаче глубину зоны аэрации вплоть до первого водоупора. По горизонтали, как правило, эффективный радиус распространения растворов составляет от 0,3 до 1,0 м. Однако при наличии трещиноватых пород распространение раствора от скважины в горизонтальном направлении может достигать десятков и даже сотен метров.

Метод струйной цементации, широко применяемый в создании грунтовых завес, был адаптирован авторами статьи для высоконапорной подачи растворов реагентов при ликвидации техногенной залежи углеводородов под площадкой одного из нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) Среднего Поволжья. Эффект очистки геосреды составил 90–95 % [35].

Методология высоконапорной подачи рабочих растворов отмывочных реагентов в диапазоне давлений 100–400 атм (10–40 МПа) была использована в проектах ликвидации ОНЭВ для выбора и обоснования конструктивно-технологических решений по обезвреживанию шламовых тел, а также геосреды в границах заброшенных накопителей отходов ЖКХ:

- выведенного из эксплуатации полигона твердых коммунальных и промышленных отходов;
- старого накопителя совместного размещения осадков хозяйственно-бытовых сточных вод и отходов целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК);
- заброшенного накопителя совместного размещения осадков насосно-фильтровальной станции (НФС) и пастообразных отходов, содержащих мышьяк и стойкие органические загрязнители.

<sup>2</sup> Якимов Н.Д., Ильинский Н.Б., Касимов А.Р., Курцева К.П., Обносков Ю.В. Фильтрация в структурно-неоднородных насыщенных и ненасыщенных пористых средах // Отчет о НИР № 96-01-00844 (Российский фонд фундаментальных исследований).

Выведенный из эксплуатации полигон расположен на водоразделе, примыкающем ко второй надпойменной террасе Саратовского водохранилища. Геологическая среда представлена перемежающимися глинистыми и суглинистыми грунтами, пропитанными многолетним поступлением органосодержащего фильтрата из свалочного массива высокой степени разложения. Возраст полигона более 50 лет.

Старый накопитель осадков и отходов ЦБК (гидролизный лигнин, целлюлозный скоп, сульфитный щелок) находится на первой надпойменной террасе, примыкающей к склону в зоне подработки водохранилища, сформированного в 60-е годы XX в. созданием плотин на оз. Выгозеро. Грунты в основа-

нии накопителя — перемежающиеся глины, супеси и пески на скальном грунте морены.

Шламонакопитель совместного размещения осадков водоподготовки и пастообразных отходов в 40–60-е гг. XX в. принадлежал закрытому химическому предприятию оборонного профиля. Объект расположен в затопляемой пойме старицы р. Чапаевки и в паводок периодически обводняется ее подрусловыми водами с выносом загрязнений второго класса опасности в водоток. Геосреда представлена загрязненными мышьяком и стойкими органическими загрязнителями аллювиальными породами: глинами с прослоями галечника и карбонатов.

Сведения по структуре и отдельным показателям накопителей приведены в таблице.

Сведения по фильтрационным и реологическим свойствам шламов и загрязненной геосреды  
Information on the filtration and rheological properties of sludge and contaminated geo-environment

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Наименование объекта Object name	Полигон ТКО г. Самара MSW landfill in Samara	Иловые площадки (г. Самара) Silt pads (Samara)	Буферный пруд КНПЗ Buffer pond KNPZ	Накопитель ЦБК (Карелия) Pulp and paper mill (Karelia)	Шламонакопитель (г. Чапаевск) Sludge accumulator (Chapaevsk)	Иловые площадки (г. Сызрань) Silt pads (Syzran)	Иловые площадки (г. Тольятти) Silt pads (Tolyatti)	Илонакопитель (г. Новокуйбышевск) Sludge accumulator (Novokuibyshevsk)	Иловые площадки (г. Чапаевск) Silt pads (Chapaevsk)	
Входные параметры Input parameters	$H_{wy}, M$ $H_{wat}, m$	50	25	25	20	25	25	40	25	25
	$H_{гр.в}, M$ $H_{aq}, m$	4	3,5	3	2,8	1,5	2	5	2	3
	$H_{ф}, M$ $H_{р}, m$	46	32	22	17,2	23,5	23	35	23	22
	Grad P	0,002	0,021	0,008	0,008	0,013	0,133	0,002	0,012	0,004
	$K_{ф}, M/c$ $K_{р}, m/s$	0,0082	0,00012	0,0000014	0,00029	0,0088	0,0000042	0,0002	0,0000022	0,0000015
	$K_{шл}, M^2$ $K_{сп}, m^2$	6,50E-09	1,20E-10	3,40E-11	5,10E-13	9,40E-10	5,70E-12	3,60E-10	4,20E-10	3,30E-11
	$K_{ге}, M^2$ $K_{geo}, m^2$	8,20E-10	1,20E-11	1,40E-13	2,90E-11	8,80E-10	4,20E-13	2,00E-11	2,20E-13	1,50E-13
	$C_{sal}, кг/M^3$ $C_{sal}, kg/m^3$	10	7	5	44	26	2	3	13	2
	$\Pi_{пр} / P_{pr}$	7,93	10	242,86	0,02	1,07	13,57	18	1909,09	220
	$\Gamma / G$	1,78	1,82	1,99	0,03	1,03	1,86	1,89	2	1,99
	$R_{шл}, тыс. м$ $R_{сп}, thou. m$	0,9	1,2	0,5	0,2	0,1	0,3	0,5	0,7	0,25
	$R_{ос}, тыс. м$ $R_{ph}, thou. m$	1,6	2,2	1	0	0,1	0,6	0,9	1,4	0,5
	$S_{ф.ге}, тыс. M^2$ $S_{f,geo}, thou. m^2$	132,3	125,7	39,4	6,5	2,3	23,1	59,7	57,9	19,7
ПЗ, M/c PZ, m/s	0,0000164	2,52E-06	1,17E-08	2,32E-06	0,0001144	5,6E-07	0,0000004	2,59E-08	6E-09	

Окончание табл. / End of the Table

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Наименование объекта Object name	Полигон ТКО г. Самара MSW landfill in Samara	Иловые площадки (г. Самара) Silt pads (Samara)	Буферный пруд КНПЗ Buffer pond KNPZ	Накопитель ЦБК (Карелия) Pulp and paper mill (Karelia)	Шламонакопитель (г. Чапаевск) Sludge accumulator (Chapaevsk)	Иловые площадки (г. Сызрань) Silt pads (Syzran)	Иловые площадки (г. Тольятти) Silt pads (Tolyatti)	Илонакопитель (г. Новокуйбышевск) Sludge accumulator (Novokuibyshevsk)	Иловые площадки (г. Чапаевск) Silt pads (Chapaevsk)
Выходные параметры Output parameters	$V_{poll}$ , м <sup>3</sup> /с $V_{poll}$ , m <sup>3</sup> /s	2,17	0,317	0,0005	0,02	0,26	0,013	0,024	0,001
	$M_{poll}$ , кг/с $M_{poll}$ , kg/s	21,7	2,22	0,0023	0,66	6,84	0,03	0,07	0,02

Примечание:  $H_{вы}$  — глубина расположения водоупора;  $H_{г.в.}$  — отметка поверхности первого водоносного горизонта;  $H_{ф}$  — толщина фронта фильтрации; Grad  $P$  — градиент напора подземных вод;  $K_{ф}$  — коэффициент фильтрации (максимальный в выборке);  $K_{шл}$  — коэффициент проницаемости шлама (максимальный в выборке);  $K_{гс}$  — коэффициент проницаемости геосреды (максимальный в выборке);  $C_{sat}$  — концентрация насыщения ключевого загрязнителя (для объектов 1, 2, 4–7, 9 — химическое потребление кислорода (ХПК); для объектов 3 и 8 — содержание нефтепродуктов, общее);  $\Pi_{пр}$  — показатель проницаемости ( $\Pi_{пр} = K_{шл}/K_{гс}$ );  $\Gamma$  — коэффициент расширения (показывает, во сколько раз ширина канала загрязненной воды за зоной загрязнения шире диаметра зоны загрязнения,  $\Gamma = (\Pi_{пр} \cdot 2)/(1 + \Pi_{пр})$ );  $R_{шл}$  — максимальный радиус шламового тела (определен по данным инженерных изысканий);  $R_{ос}$  — максимальный радиус ореола загрязнения геосреды (определен по данным инженерных изысканий);  $S_{ф.гс}$  — поперечная площадь фильтрации геосреды; ПЗ — поток загрязнений ( $ПЗ = \text{grad } P \cdot K_{ф}$ );  $V_{poll}$  — производительность зоны загрязнений ( $V_{poll} = ПЗ \cdot S_{ф.гс} \cdot 1000$ );  $M_{poll}$  — масса выносимых загрязнений ( $M_{poll} = V_{poll} \cdot C_{sat}$ ).

Note:  $H_{wat}$  — the depth of the location of the aquiclude;  $H_{aq}$  — mark of the surface of the first aquifer;  $H_f$  is the thickness of the filtration front; Grad  $P$  is the groundwater pressure gradient;  $K_f$  — filtration coefficient (maximum in the sample);  $K_{sl}$  — sludge permeability coefficient (maximum in the sample);  $K_{geo}$  is the permeability coefficient of the geo-environment (maximum in the sample);  $C_{sat}$  — saturation concentration of the key pollutant (for objects 1, 2, 4–7, 9 — COD; for objects 3 and 8 — the content of oil products, total);  $P_{pr}$  — permeability index ( $P_{pr} = K_{sl}/K_{geo}$ );  $G$  — expansion coefficient (shows how many times the width of the contaminated water channel behind the pollution zone is wider than the diameter of the pollution zone,  $G = (P_{pr} \cdot 2)/(1 + P_{pr})$ );  $R_{sl}$  — maximum radius of the sludge body (determined according to engineering survey data);  $R_{ph}$  is the maximum radius of the halo of pollution of the geo-environment (determined according to engineering survey data);  $S_{f,geo}$  — transverse area of geo-environment filtration;  $PZ$  — pollution flux ( $PZ = \text{grad } P \cdot K_f$ );  $V_{poll}$  is the productivity of the contaminated zone ( $V_{poll} = PZ \cdot S_{f,geo} \cdot 1,000$ );  $M_{poll}$  — mass of pollutants carried out ( $M_{poll} = V_{poll} \cdot C_{sat}$ ).

Все три накопителя представляют собой объекты накопленного экологического вреда, в которые совместно с отходами ЖКХ в составе ТКО различной степени разложения и обводнения, ОСВ и ОВП размещали вязкие, тугопластичные промтоходы вплоть до 2-го класса опасности.

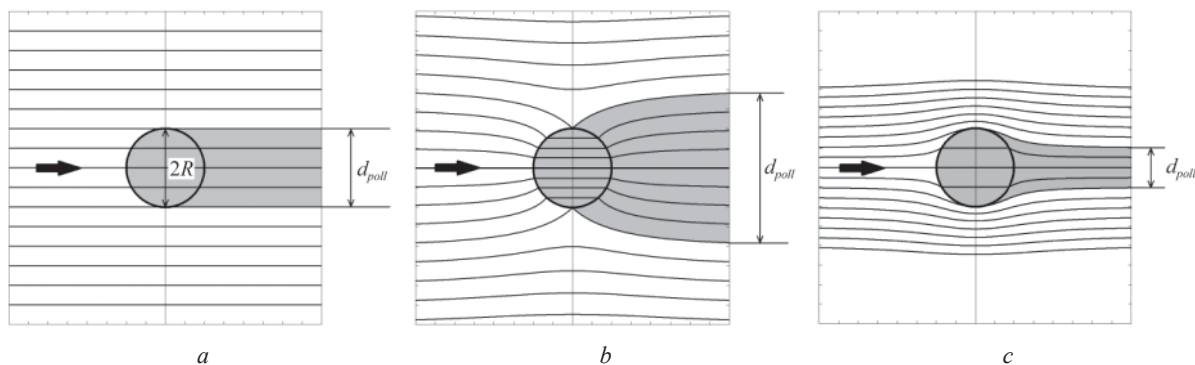
Геосреда за пределами накопителей по ходу потока подземных вод пропитана инфильтратами из шламовых тел. Обводненные и загрязненные породы зоны аэрации вследствие этого имеют широкий диапазон значений коэффициента вязкости ( $\mu_{гс} = 98,0\text{--}38\,488 \text{ Па}\cdot\text{с} \cdot 10^{-3}$ ), характеризующие выделенный флюид по типу жидкости от ньютоновской до дилатантной. Проницаемость шламов

$K_{шл}$  и загрязненных пород геосреды  $K_{гс}$  так же имеет широкий диапазон значений: от  $10^{-8}$  до  $10^{-14} \text{ м}^2$ .

Для каждого из рассмотренных объектов были разработаны математические модели фильтрации загрязненной жидкости в геосреду из шламовых тел (рис. 1).

Для подтверждения предпосылок моделирования проведен промышленный эксперимент по высоконапорной подаче рабочего раствора отмывочного реагента в геосреду. Эксперимент осуществлен на площадке старого шламонакопителя г. Чапаевска.

Накопитель был построен в 50-х гг. и выведен из эксплуатации в конце 80-х гг. До вывода из экс-



**Рис. 1.** Математические модели фильтрации загрязненной жидкости из шламовых тел в геосреду для различных условий проницаемости в ПТС «шламовое тело – загрязненная геосреда»: *a* — случай  $K_{\text{шл}} = K_{\text{гео}}$  (Шламонакопитель, Чапаевск). Фильтрация жидкости через область загрязнения радиусом  $R$ . Направление фильтрации жидкости показано стрелкой, линии тока — сплошными линиями, загрязненная жидкость — серым цветом. Диаметр канала загрязнения  $d_{\text{poll}}$  совпадает с диаметром зоны загрязнения ( $\Gamma = 1$ ); *b* —  $K_{\text{шл}} \gg K_{\text{гео}}$  (Накопитель ЦБК). Диаметр канала загрязнения  $d_{\text{poll}}$  совпадает с удвоенным диаметром зоны загрязнения ( $\Gamma = 2$ ); *c* — случай  $K_{\text{шл}} \ll K_{\text{гео}}$  (полигон ТКО). Диаметр канала загрязнения  $d_{\text{poll}}$  равен половине диаметра загрязненной зоны ( $\Gamma = 0,5$ )

**Fig. 1.** Mathematical models of contaminated fluid filtration from sludge bodies into the geo-environment for various permeability conditions in the PTS “slurry body – polluted geo-environment”: *a* — case  $K_{\text{sl}} = K_{\text{geo}}$  (sludge accumulator, Chapaevsk). Fluid filtration through a contaminated area with radius  $R$ . The direction of fluid filtration is shown by an arrow, the streamlines are solid lines, the contaminated fluid is shown in gray. The diameter of the contamination channel  $d_{\text{poll}}$  coincides with the diameter of the contamination zone ( $G = 1$ ); *b* — case  $K_{\text{sl}} \gg K_{\text{geo}}$  (PPM storage). The pollution channel diameter  $d_{\text{poll}}$  coincides with the double diameter of the pollution zone ( $G = 2$ ); *c* — case  $K_{\text{sl}} \ll K_{\text{geo}}$  (MSW landfill). The pollution channel diameter  $d_{\text{poll}}$  is equal to half the diameter of the polluted zone ( $G = 0.5$ )

плутации объект одновременно выполнял функции технологического сооружения и объекта обращения с отходами (размещение совместно с осадками водоподготовки, шламовых отходов химпроизводства, содержащих в своем составе пентахлорфеноляты и мышьяк).

В настоящее время шламонакопитель представляет собой объект, оказывающий отрицательное воздействие и на геосреду, и на водоем.

Илонакопитель расположен на территории основной технологической площадки предприятия на расстоянии 50–80 м от уреза старицы р. Чапаевки, впадающей в Саратовское водохранилище. Площадь илонакопителя составляет 4,0 га. Максимальная глубина шламового тела — 8 м. Мощность шламового тела, по данным комплексных инженерных изысканий, — до 0,4 млн т. Шламовое тело состоит из фрагментов пастообразного и частично жидкого материала, обводняемого разливами р. Чапаевки в паводок. Шлам — многокомпонентная среда с преобладанием включений «связанная жидкость в порах твердого тела», «жидкость в жидкости», «мелкодисперсная и коллоидная фаза в жидкости». Извлеченный из шлама инфильтрат представляет собой агрессивную псевдопластичную массу вязкостью более 2000 мПа·с. Граница распространения инфильтрата в геосреде по вертикали — до 10–15 м от подошвы отходов; по горизонтали — до 1,5 км по уклону в сторону области разгрузки. За 70 лет существования шламонакопи-

теля трансфер инфильтрата привел к загрязнению прибрежной части водотока. Мощность нарушенной геосреды под воздействием шламового тела — приблизительно 2,5 млн т определена оконтуриванием в ходе производства буровых работ на этапе инженерных изысканий.

Геосреда представлена песчаными и суглинистыми грунтами с коэффициентом проницаемости  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  м<sup>2</sup> (максимальное значение в выборке анализов). Анализ фильтрационно-реологических показателей инфильтрата позволил отнести его к неньютоновской жидкости с бингамовскими свойствами.

Проницаемость шлама и окружающей его геосреды примерно одинаковы. Диаметр канала загрязнений в соответствии с предлагаемой моделью совпадает с зоной загрязнений ( $\Gamma = 1$ ).

На глубине  $25,0 \pm 5,0$  м от основания шламов расположен региональный водоупор плотных глин, являющийся естественным барьером для защиты второго (напорного) горизонта от загрязнения «сверху».

Главная сложность возникла при изучении фильтрационно-реологических характеристик геосреды, загрязненной инфильтратом из шламонакопителя. По результатам пробного бурения основные очаги загрязнения находятся на глубинах свыше 10 м, при которых отбор проб затруднен. Оценка загрязненности для последующего обезвреживания геосреды стала возможной с использованием

закрытых методов, в частности высоконапорной струйной промывки с отведением загрязненного стока из толщи геосреды в закрытый дренаж и далее на КОС.

Технологическая схема установки по выполнению промышленного эксперимента представлена на рис. 2. Приготовление крупнотоннажных рабочих растворов реагентной смеси, их дозирование и высоконапорную подачу в геосреду, а также последующую откачку эмульсии осуществляли на специально подготовленном опытном участке.

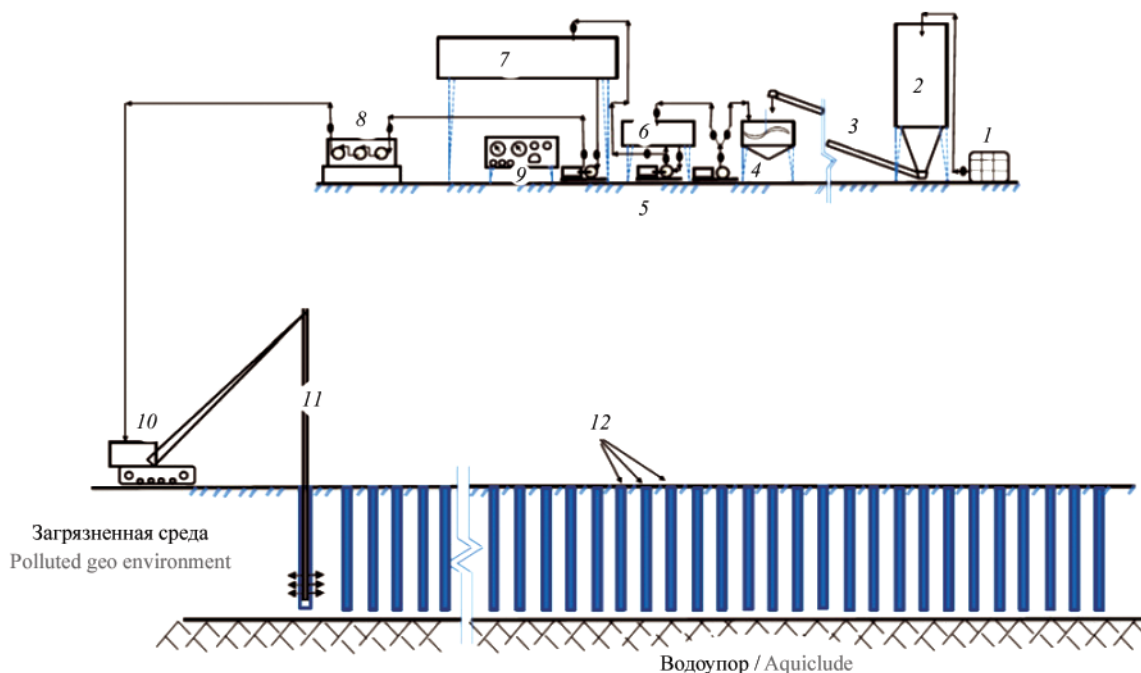
Оборудование, задействованное в полупромышленных исследованиях, включало узел приготовления флокулянта, совмещенный с высоконапорной насосной станцией (ВНС), а также мобильный экструдер подачи раствора флокулянта в геосреду через куст заранее подготовленных скважин, которые были пробурены на территории опытного участка в породах зоны аэрации. Глубина скважин составляла  $20,0 \pm (0,5-1,0)$  м выше поверхности регионального водоупора, представленного плотными суглинистыми грунтами. Головная скважина

использована в качестве нагнетательной для высоконапорной подачи рабочего раствора. Остальные скважины по направлению в сторону водоисточника области разгрузки использованы для извлечения обработанной реагентной смесью эмульсии на основе подземных вод и загрязнений, переведенных из «защемленного» в свободное состояние.

Для оценки эффективности очистки геосреды от остаточных загрязнений применен метод опытных наливов в скважины с последующим отбором проб на анализ. Пробы воды из проходок, обработанных методом высоконапорной промывки, отбирали по направлениям от накопителей к областям разгрузки с целью оценки перемещения загрязненной жидкости в пористой среде.

Устройство включает два независимых блока: стационарный (ВНС) и мобильный на базе гусеничного экструдера (рис. 3, 4).

Установка оборудована узлами затворения реагента, приготовления раствора с заданными рабочими концентрациями и его дозирования в зону аэрации.



**Рис. 2.** Технологическая схема выполнения промышленного эксперимента по высоконапорной закачке очистного реагента в загрязненную геосреду: 1 — бак приготовления флокулянта; 2 — бункер цемента; 3 — нория; 4 — растворный бак с мешалкой; 5 — насосная группа; 6 — расходный бак; 7 — аккумулирующая емкость; 8 — плунжерный трехступенчатый насос высокого давления; 9 — блок управления; 10 — мобильный экструдер (высоконапорный нагнетатель); 11 — высоконапорное нагнетательное устройство; 12 — система скважин для пробоотбора

**Fig. 2.** Technological scheme for the production of an industrial experiment on high-pressure injection of a cleaning agent into a polluted geo-environment: 1 — flocculant preparation tank; 2 — cement bunker; 3 — bucket elevator; 4 — solution tank with a stirrer; 5 — pumping group; 6 — supply tank; 7 — storage tank; 8 — plunger three-stage high pressure pump; 9 — control unit; 10 — mobile extruder (high-pressure supercharger); 11 — high-pressure injection device; 12 — well system for sampling



Рис. 3. Высоконапорная насосная станция  
Fig. 3. High-pressure pumping station



Рис. 4. Мобильный экструдер в нерабочем состоянии  
Fig. 4. Mobile extruder in non-working condition

Все параметры эксперимента, включая давление, расходы рабочих растворов, концентрации реагентов, контролировали при помощи электронных блоков управления, расположенных как в ВНС, так и на мобильном экструдере.

В ходе промышленного эксперимента изучали зависимости изменения фильтрационно-реологических свойств природной среды при высоконапорной подаче рабочего раствора флокулянта.

В качестве основного флокулянта использован отмыватель безотходный ингибирующий самоочищающийся (О-БИС) в дозировке  $5,0 \pm 0,5$  мг/кг масс обрабатываемого грунта. Данный флокулянт предназначен для перевода «защемленных» в порах загрязнений в свободное состояние с их последующим извлечением при откачке. Содержание флокулянта в рабочем растворе соответствует рекомендуемым рациональным значениям концентрации отмывающих реагентов при физико-химическом обезвреживании нефтезагрязненных грунтов [36, 37].

При контакте флокулянта с загрязнениями происходило смещение стабилизационного слоя на поверхности раздела фаз с проникновением активного вещества в межфазное пространство и замещение адсорбционного слоя. Уменьшение поверхностного натяжения обеспечило более высокую степень свободы поверхности глобул и не препятствовало их слиянию [38].

Кроме того, «ударное» высоконапорное воздействие (100–400 атм) на структуру неньютоновской жидкости загрязнителя позволило снизить ее

вязкость с улучшением подвижности загрязнений в растворе и последующим выводом в дренаж.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Производственный эксперимент по высоконапорной обработке загрязнений имел целью проанализировать изменение фильтрационно-реологических свойств от давления нагнетания рабочих растворов промывочной жидкости в интервале значений  $(10,0–40,0) \pm 1,0$  МПа с шагом  $10,0 \pm 1,0$  МПа. При этом содержание флокулянта в рабочем растворе —  $5,0 \pm 0,5$  мг/л и температура среды —  $5,0 \pm 2,0$  °С на глубине  $25,0 \pm 5,0$  м были постоянными для каждой из опытных серий и соответствовали своим наиболее распространенным значениям в технологиях-аналогах [39, 40].

Входными параметрами выступили давление нагнетания  $P_{\text{нагн}}$ , МПа, и расстояние от нагнетающей скважины.

Выходными параметрами в эксперименте по определению фильтрационных свойств экосистемы стали величины эффекта изменения водопитока ( $V_{\text{poll}}$  — производительность зоны загрязнений, м<sup>3</sup>/с) и интенсивность массы выносимых загрязнений  $M_{\text{poll}}$ , кг/с.

Выходными параметрами в эксперименте по определению реологических свойств экосистемы явились значения вязкости шлама  $\mu_{\text{шл}}$  и вязкости геосреды  $\mu_{\text{гс}}$  (максимальные в выборке), а также значения скорости сдвига  $\gamma$ , установленные в лабораторных условиях.

На рис. 5, 6 представлены соответственно зависимости эффектов изменения водопритока и интенсивности массы выносимых загрязнений по траектории прогнозного радиуса ПТЭ для различных условий реагентно-высоконапорной обработки.

На рис. 7 показаны зависимости изменения вязкости от скорости сдвига в логарифмических координатах для различных образцов ПТЭ, извлеченных как из шламовых тел, так и из геосреды пород зоны аэрации.

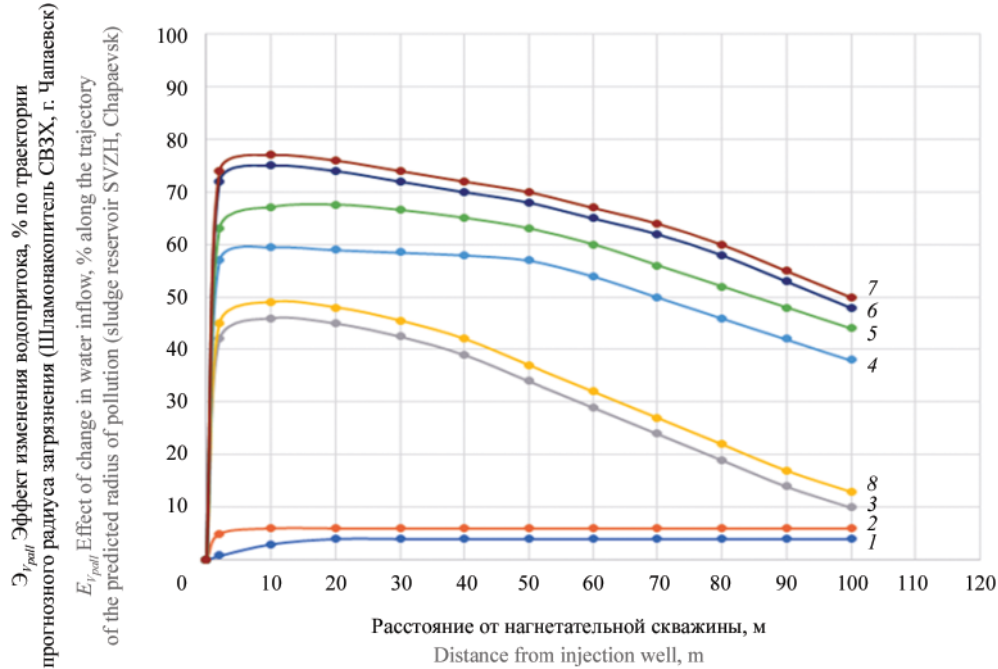


Рис. 5. Эффект изменения водопритока в зависимости от удаления от нагнетательной скважины

Fig. 5. The effect of changing water inflow, depending on the distance from the injection well

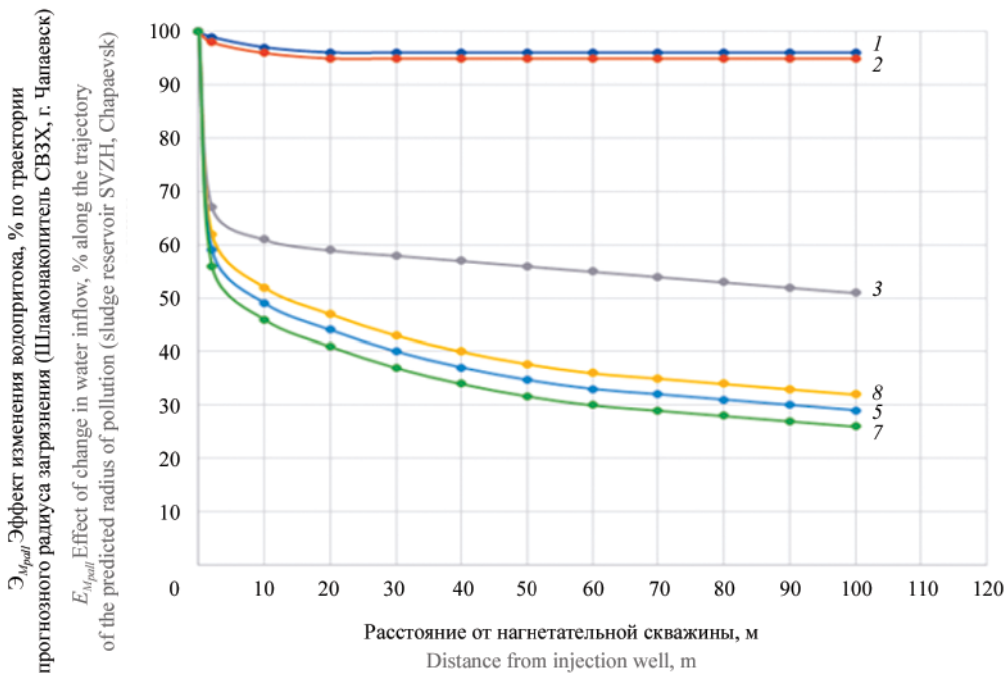
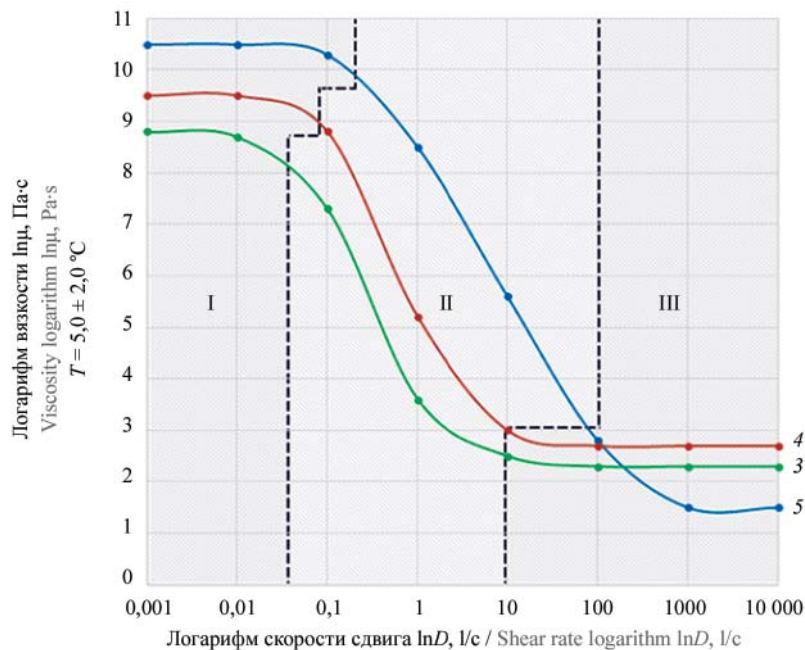


Рис. 6. Эффект изменения интенсивности массы выносимых загрязнений по траектории прогнозного радиуса ПТЭ

Fig. 6. The effect of changing the intensity of the mass of pollutants carried out along the trajectory of the predicted radius of the TOR



**Рис. 7.** Кривая вязкости для вязкостно-деформационной характеристики образцов ПТЭ на основе мышьякосодежащего шламонакопителя, г. Чапаевск: 3 — смесь целлюлозного скопа и гидролизного лигнина, обводненная,  $W = 60 \pm 5,0 \%$ , с орг.  $75 \pm 5,0 \%$ ; 4 — глина обводненная целлюлозным скопом,  $W = 60 \pm 5,0 \%$ , с орг.  $30 \pm 5,0 \%$ ; 5 — глина обводненная целлюлозным скопом,  $W = 30 \pm 5,0 \%$ , с орг.  $20 \pm 5,0 \%$ . Температура отбора образцов —  $5,0 \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$  с глубины  $20,0 \pm 0,5 \text{ м}$ ; I — первая ньютоновская область; II — область падения вязкости; III — третья ньютоновская область

**Fig. 7.** Viscosity curve for the viscosity-strain characteristics of PTE samples based on an arsenic-containing sludge reservoir in Chapaevsk: 3 — a mixture of cellulose osprey and hydrolytic lignin, watered,  $W = 60 \pm 5.0 \%$ , from org.  $75 \pm 5.0 \%$ ; 4 — clay watered with cellulose osprey,  $W = 60 \pm 5.0 \%$ , from org.  $30 \pm 5.0 \%$ ; 5 — clay flooded with cellulose osprey,  $W = 30 \pm 5.0 \%$ , from org.  $20 \pm 5.0 \%$ . Sampling temperature —  $5.0 \pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , from a depth of  $20.0 \pm 0.5 \text{ m}$ ; I — first Newtonian region; II — viscosity drop area; III — third Newtonian region

Производительность зоны загрязнения  $V_{poll}$  м<sup>3</sup>/с, представляет собой расход подземной воды, продуцируемый в единицу времени шламовым телом.

$V_{poll}$  определяется по формуле:

$$V_{poll} = ПЗ \cdot S_{nc} \cdot 1000,$$

где ПЗ — поток загрязнения или скорость жидкости, проходящей через поперечное сечение области загрязнений в единицу времени;  $S_{nc}$  — площадь поперечного сечения природной среды, загрязненной шламовым телом и инфильтратами из него на расстоянии прогнозного радиуса загрязнения  $R_3$ .

Прогнозный радиус загрязнения  $R_3$ , м — расстояние от границы шламового тела, как источника загрязнений, до наиболее удаленной точки среды, в которой обнаружено загрязнение.

Интенсивность выноса загрязнителя  $M_{poll}$  — это количество загрязнителя, вымываемого в единицу времени грунтовыми водами из области загрязнения:

$$M_{poll} = V_{poll} \cdot \rho \cdot C_{sat},$$

где  $C_{sat}$  — концентрация насыщенного раствора загрязнителя в подземной воде.

Из графика на рис. 7, обозначенного нами как вязкостно-деформационная характеристика шламов, видно, что наиболее интенсивно увеличение проницаемости пор загрязненной геосреды, определенное по величинам прироста притока, происходит в диапазоне давлений  $(20\text{--}30) \pm 1,0 \text{ МПа}$ . В этом же диапазоне давлений наблюдалось снижение вязкости отобранных образцов.

Интерес представляет изменение вязкости образцов шламов и загрязненной геосреды (глины), содержащих неньютоновскую жидкость на границе бингамовских и дилатантных свойств (образцы шламов) в диапазоне значений вязкости  $5000\text{--}38\ 000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , в зависимости от величин скорости сдвига. На графике в логарифмических координатах выделяются три области.

Область I, в которой вязкость еще не зависит от скорости сдвига (интервал  $\ln D = 0,0001\text{--}0,1$ ). На начальной области I реологические свойства шламов соответствуют значениям вязкости более  $5000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , что затрудняет промывку среды от загрязнений с использованием высоконапорных методов с давлением менее  $10 \text{ МПа}$ .

В границах области II повышение скорости сдвига  $\ln D$  за значение более 0,1, происходит уменьшение вязкости с приобретением шламовыми образцами текучих свойств вследствие разрыва молекулярных связей между частицами. Данная область соответствует значениям высоконапорных давлений в границах 10–30 МПа. В этой области наблюдается увеличение эффекта водопритока  $V_{poll}$  в контрольных скважинах по траектории эффективного радиуса воздействия экструдера на расстоянии до  $40 \pm 5$  м от нагнетательной скважины (см. рис. 5). Соответственно, возрастает скорость выноса токсиантов (определялась по эффекту  $M_{poll}$ ) в сторону дренажа из-за перевода заземленных загрязнений в свободное состояние (см. рис. 6).

Третья область на графике вязкости показывает, что реологические свойства образцов остаются неизменными даже при превышении давления нагнетания за пределы 30 МПа и более. Это объясняется гистерезисными свойствами образцов, а также пределом насыщения порового пространства загрязнениями в концентрациях  $S_{sat}$ .

Подъем давления за порог 30 МПа не привел к существенному изменению эффектов увеличения проницаемости и снижения вязкости даже при избытке подачи флокулянта в рабочий раствор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам промышленных исследований был разработан способ высоконапорной реагентной промывки пород зоны аэрации от загрязнений органической и минеральной природы, содержащихся в инфильтратах на основе жидкостей различной вязкости [41]. Эффективность промывки составила до 90 %. Разрабатываемый состав можно приспособить под условия работы заводских очистных сооруже-

ний с целью минимизации затрат на совместную очистку загрязненных подземных вод с производственным стоком КОС.

Поведение потока дало возможность выявить гидродинамическую связь между поглощающей и извлекаемыми скважинами в условиях опытных участков. Отслеживание концентраций загрязнителей, отобранных до и после обработки высоконапорной промывкой, способствовало уточнению цифровой модели природной среды, разработке мероприятий по изменению фильтрации и обеспечению воздействия на объекты испытания в целом.

Вязкостно-деформационная характеристика, наряду с эффективностями изменения водопритока и выноса загрязнений при различных значениях давлений нагнетания по траектории эффективного радиуса воздействия, позволяет для загрязненных шламами сред с широким диапазоном фильтрационно-реологических свойств определить конструктивно-технологические особенности промывки: давление нагнетания, количество и шаг нагнетательных скважин и другие условия ликвидации загрязнений в экосистемах, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями.

Изменение фильтрационно-реологических характеристик среды в ходе высоконапорного воздействия сопровождалось переводом «заземленных» в порах грунта загрязнений в свободное состояние. При этом увеличивались значения потока загрязнений, производительности зоны загрязнений и интенсивности их выноса.

Предлагаемые методы прогнозирования и ликвидации загрязнений были использованы в проектах ликвидации объектов накопленного экологического вреда, сформированных бездействующими накопителями шламовых отходов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уварова Н.А., Тупицына О.В., Истомина Е.П., Чертес К.Л. Совершенствование технологии санации накопителей шламов химводоподготовки // Инновации в теории и практике обращения с отходами : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2009. С. 278–280.
2. Ягафарова Г.Г., Барахнина В.Б. Утилизация экологически опасных буровых отходов // Нефтегазовое дело. 2006. № 1. С. 38. EDN TWWNB.
3. Вайсман Я.И., Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Использование материального потенциала опасных промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 1. С. 27–34.
4. Богданов А.В. Развитие научных и практических основ экологических технологий комплексной переработки осадков карт-шламонакопителей: на примере Байкальского региона : дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2006. 275 с.
5. Королёв В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М. : Наука/Интерпериодика, 2001. 364 с.
6. Калинин А.Г., Никитин Б.А., Солодкий К.М., Султанов Б.З. Бурение наклонных и горизонтальных скважин : справочник. М. : Недра, 1997. 647 с.
7. Потапов А.Д., Воронцов Е.А., Тупицына О.В., Сухоносова А.Н., Савельев А.А., Гришин Б.М. и др. Принципы управления экологически безопасным градостроительным восстановлением территорий, нарушенных размещением отходов разного генезиса // Вестник МГСУ. 2014. № 7. С. 110–132.
8. Михайлов Е.В. Совершенствование технологии совместного размещения осадков сточных вод и твердых бытовых отходов : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2009. 131 с.
9. Князев В.В., Комаров Ю.А. Экологические аспекты совместного размещения твердых гали-

товых отходов и глинисто-солевых шламов // Горный журнал. 2016. № 4. С. 97–101. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.20. EDN WHFTDX.

10. Одарюк В.А., Тронин С.Я., Сканцев В.И. Проблемы утилизации отходов производства и потребления // Технологии гражданской безопасности. 2012. Т. 9. № 3 (33). С. 72–79.

11. Иванков С.И., Шубов Л.Я., Троицкий А.В., Доронкина И.В., Скобелев К.Д. Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2022. № 2. С. 3–103. DOI: 10.36535/0235-5019-2022-02-1. EDN WZYCRF.

12. Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / пер. с англ. Д.А. Казенина. М.: Наука, 1978. 309 с.

13. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения / пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.

14. Бетяев С.К. Локальные теории в гидродинамике. Уравнение Навье – Стокса: задачи, математические модели, решения // Труды ЦАГИ. 2010. № 2687. С. 1–80. EDN OTIGJF.

15. Синькова Е.А. Рациональные способы санирования очагов техногенного загрязнения углеводородными соединениями: автореф. дис ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 20 с.

16. Лапин А.П., Новиков А.Н., Глухов А.А., Садыков Р.Р. Восстановление загрязненной почвы нефтью и нефтепродуктами // Мир транспорта и технологических машин. 2009. № 2 (25). С. 105–113. EDN TBTNHP.

17. Быков Д.Е., Чертес К.Л., Михайлов Е.В., Тупицына О.В. Геоэкологические направления рекультивации неорганизованных объектов размещения органоминеральных отходов // Сб. докл. пятого междунар. конгресса по управлению отходами и природоохранными технологиями ВэйстТэк-2007. М., 2007.

18. Самарина О.А., Чертес К.Л., Тупицына О.В. Обработка высококонцентрированных сточных вод накопителей углеводородсодержащих отходов: монография. Самара: Самарский государственный технический университет, 2011. 149 с.

19. Стенькин А.В., Астаркин С.В., Котенёв Ю.А., Мухаметшин В.Ш., Султанов Ш.Х. Изучение влияния закачки пластовых вод на набухание глинистых минералов цемента пластов месторождений Шаимского региона // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 4. С. 41–45. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-4(328)-41-45. EDN BDBAVC.

20. Дрегуло А.М. Объекты накопленного экологического вреда в пространственно-временной динамике развития городского хозяйства // Использо-

вание и охрана природных ресурсов в России. 2019. № 2 (158). С. 88–94. EDN CMDXRX.

21. Питулько В.М. Методология накопленного экологического вреда как инструмент реабилитации водосборной геосистемы // Вода Magazine. 2018. № 3 (127). С. 48–52. EDN YTFKVC.

22. Бахтигареев И.А., Гирфанов В.Т., Тентерева Г.А., Конесев Г.В. Повышение эффективности по целевому назначению лигносульфонатных реагентов для буровых растворов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 2 (130). С. 9–15. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-2-9-15. EDN IMSROK.

23. Кудряшов С.И., Бачин С.И., Афанасьев И.С., Латыпов А.Р., Свешиников А.В., Усманов Т.С. и др. Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов на месторождениях НК «Роснефть» // Вестник ЦКР Роснедра. 2006. № 2. С. 72–84.

24. Юсифов Т.Ю., Попов В.Г., Фаттахов И.Г., Сафиуллина А.Р., Исмаилов Ф.С. Гидроразрыв пласта и его эффективное применение // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 23–28. EDN UCQRKT.

25. Васильев В.А., Верисокин А.Е. Гидроразрыв пласта в горизонтальных скважинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 6. С. 101–110. EDN SGLWOD.

26. Захаров С.В., Радченко В.Г., Семенов Ю.Д., Сулимов В.С., Смоленков В.Ю., Таймасханов А.М. Метод струйной цементации в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. 2008. № 4. С. 2–11. EDN IUKJHP.

27. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 310–315. EDN RTSQUJ.

28. Шишкин В.Я., Погорелов А.Е. Применение струйной геотехнологии при реконструкции объектов в условиях городской застройки // Интеграл. 2011. № 3. С. 124–128.

29. Гришко Д.А., Шуплик М.Н., Куликова Е.Ю. Перспективы применения струйной цементации в городском подземном строительстве с целью снижения экологических рисков // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 9. С. 16–22. EDN OCBUTD.

30. Kim D., Lai H.T., Chilingar G.V., Yen T.F. Geopolymer formation and its unique properties // Environmental Geology. 2006. Vol. 51. Issue 1. Pp. 103–111. DOI: 10.1007/s00254-006-0308-z

31. Izquierdo M., Querol X., Davidovits J., Antenucci D., Nugteren H., Fernández-Pereira C. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching // Journal of Hazardous Materials.

2009. Vol. 166. Issue 1. Pp. 561–566. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.063

32. *Гласко А.В., Калмыков А.М., Мецгерин И.В., Федотов А.А., Храпов П.В.* Замораживание грунтов оснований геотехнических объектов в криолитозоне с помощью вертикальных термостабилизаторов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*. 2012. № 7 (7). С. 33. EDN QIUPHD.

33. *Абрамова Т.Т.* Силикатизация структурно-неустойчивых грунтов (часть 1) // *Инженерная геология*. 2017. № 6. С. 34–45. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-6-34-45. EDN QILWRZ.

34. *Петренко Е.Н.* Комплексная экологическая система оценки и ликвидации техногенных залежей углеводородов : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2022. 122 с.

35. *Ксенофонтов Б.С.* Очистка воды и почвы флотацией : монография. М. : Новые технологии, 2004. 224 с. EDN QNKPDH.

36. *Галеев Р.Г., Купцов А.В., Гимаев Р.Н., Теляшев В.Г.* Флокулянты для разделения нефтешламов

НПЗ // *Вода: экология и технология : III Междунар. конгресс*. 1998. С. 382.

37. *Дерягин Б.В., Чураев М.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. М. : Наука, 1985. С. 3.

38. *Валиуллина А.У., Шамсутдинова Л.Р., Хизбуллин Ф.Ф.* Экологическое восстановление загрязненных земель, деградированных в результате деятельности химических производств // *Нефтегазовые технологии и новые материалы (проблемы и решения)*. 2012. С. 208–211. EDN ULLKJX.

39. *Гариб М.* Измерения температуры грунта на разной глубине // *Инновационные научные исследования*. 2021. № 3–2 (5). С. 15–23. DOI: 10.5281/zenodo.4677319. EDN AWKBVU.

40. *Черныш А.С., Губарев С.А.* Учет реологических особенностей грунта // *Вектор ГеоНаук*. 2018. Т. 1. № 1. С. 5–7. EDN XREADB.

41. Патент RU № 2752983 Способ очистки нефтезагрязненного грунта с применением высоконапорной технологии / *О.В. Тупицына, К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, Е.Н. Петренко, А.А. Букин, Д.Н. Шерстобитов, Д.Е. Быков, Г.Г. Гилаев*; заявл. № 2020135452 от 27.10.2020, опубл. 11.08.2021.

Поступила в редакцию 13 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Константин Львович Чертес** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической технологии и промышленной экологии, член-корреспондент РАЕН; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

**Алексей Александрович Букин** — аспирант; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 1161685; alkattras\_b@mail.ru;

**Николай Сергеевич Бухман** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 27408; physics@samgtu.ru;

**Виталий Николаевич Пыстин** — кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; Vitaliy.pystin@yandex.ru;

**Артём Петрович Сеяноко** — студент; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; ORCID: 0000-0002-8360-4138; artem-seyanko@mail.ru;

**Ольга Владимировна Тупицына** — доктор технических наук, профессор, доцент, заведующая кафедрой химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; Olgatupicyna@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Uvarova N.A., Tupitsyna O.V., Istomina E.P., Chertes K.L. Improving the technology of sanitation of sludge storage tanks for chemical water treatment. *Inno-*

*vations in theory and practice and waste management : proceedings of the international scientific-practical conference*. 2009; 278-280. (rus.).

2. Yagafarova G.G., Barakhnina V.B. Utilization of environmentally hazardous drilling waste. *Oil and Gas Business*. 2006; 1:38. EDN TWWNB. (rus.).
3. Vaysman Ya.I., Kalinina E.V., Rudakova L.V. Use of the material potential of hazardous industrial waste. *Theoretical and Applied Ecology*. 2013; 1:27-34. (rus.).
4. Bogdanov A.V. *Development of scientific and practical foundations of ecological technologies for the complex processing of sediments from sludge reservoirs: on the example of the Baikal region : dis. ... Dr. tech. Sciences*. Irkutsk, 2006; 275. (rus.).
5. Korolev V.A. *Soil cleaning from pollution*. Moscow, Nauka/Interperiodika, 2001; 364. (rus.).
6. Kalinin A.G., Nikitin B.A., Solodkiy K.M., Sul-tanov B.Z. *Drilling of inclined and horizontal wells : reference book*. Moscow, Nedra, 1997; 647. (rus.).
7. Potapov A.D., Vorontsov E.A., Tupitsyna O.V., Sukhonosova A.N., Savel'ev A.A., Grishin B.M. et al. Principles of Managing ecologically safe architectural reconstruction of the territories affected by waste disposal of different Genesis. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2014; 7:110-132. (rus.).
8. Mikhailov E.V. *Improving the technology of joint placement of sewage sludge and solid household waste : dis. ... cand. tech. sciences*. Ufa, 2009; 131. (rus.).
9. Knyazev V.V., Komarov Yu.A. Ecological aspects of joint disposal of solid halite wastes and clay-salt sludge. *Gornyi Zhurnal*. 2016; 4:97-101. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.20. EDN WHFTDX. (rus.).
10. Odaryuk V.A., Tronin S.Ya., Skantsev V.I. Problems of utilization of production and consumption wastes. *Civil Security Technologies*. 2012; 9(3):72-79. (rus.).
11. Ivankov S.I., Shubov L.Ya., Troitsky A.V., Doronkina I.V., Skobelev K.D. Rational patented technologies for the processing and disposal of solid industrial waste. *Problems of the Environment and Natural Resources*. 2022; 2:3-103. DOI: 10.36535/0235-5019-2022-02-1. EDN WZYCRF. (rus.).
12. Astarita J. *Fundamentals of hydromechanics of non-Newtonian fluids* / transl. from English by D.A. Kazenin. Moscow, Nauka Publ., 1978; 309. (rus.).
13. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Rheology: concepts, methods, applications* / transl. from English. St. Petersburg, Profession Publ., 2007; 560. (rus.).
14. Betyaev S.K. Local theories in hydrodynamics. Navier – Stokes equation: problems, mathematical models, solutions. *Proceedings of TsAGI*. 2010; 2687: 1-80. EDN OTIGJF. (rus.).
15. Sinkova E.A. *Rational ways of sanitation of the centers of technogenic pollution by hydrocarbon compounds : thesis abstract ... Candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg, 2006; 20. (rus.).
16. Lapin A.P., Novikov A.N., Glukhov A.A., Sadykov R.R. Restoration of polluted soil with oil and oil products. *World of Transport and Technological Machines*. 2009; 2(25):105-113. EDN TBTNHP. (rus.).
17. Bykov D.E., Chertes K.L., Mikhailov E.V., Tupitsyna O.V. Geocological directions of reclamation of unorganized objects of disposal of organo-mineral waste. *Collection of reports of the fifth international congress on waste management and environmental technologies WasteTech-2007*. Moscow, 2007. (rus.).
18. Samarina O.A., Chertes K.L., Tupitsyna O.V. *Treatment of highly concentrated wastewater from hydrocarbon-containing waste storage tanks : monograph*. Samara, Samara State Technical University, 2011; 149. (rus.).
19. Stenkin A.V., Astarkin S.V., Kotenev Yu.A., Mukhametshin V.S., Sultanov S.K. Study of the water injection into formation influence on the clay minerals swelling in cement layers in Shaim region deposits. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2019; 4:41-45. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-4(328)-41-45. EDN BDBAVC. (rus.).
20. Dregulo A.M. Objects of accumulated environmental damage in the spatio-temporal dynamics of development municipal economy. *Use and Protection of Natural Resources in Russia*. 2019; 2(158):88-94. EDN CMDXRK. (rus.).
21. Pitulko V.M. Adaptation of the methodology of brownfields environmental damage as a tool of rehabilitation of the watershed geosystems. *Water Magazine*. 2018; 3(127):48-52. EDN YTFKVC. (rus.).
22. Bakhtigareev I.A., Girfanov V.T., Teptereva G.A., Konesev G.V. Increasing the efficiency of targeted purpose of lignosulfonate reagents for drilling fluids. *Problems of collection, preparation and transport of oil and oil products*. 2021; 2(130):9-15. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-2-9-15. EDN IMSROK. (rus.).
23. Kudryashov S.I., Bachin S.I., Afanasiev I.S., Latypov A.R., Sveshnikov A.V., Usmanov T.S. et al. Hydraulic fracturing as a way to develop low-permeability reservoirs in the fields of NK Rosneft. *Bulletin of the Central Committee of the Federal Agency for Subsoil Use*. 2006; 2:72-84. (rus.).
24. Yusifov T.Yu., Popov V.G., Fattakhov I.G., Safiullina A.R., Ismailov F.S. Hydraulic fracturing and its effective application. *Scientific Review*. 2015; 8:23-28. EDN UCQRKT. (rus.).
25. Vasiliev V.A., Verisokin A.E. Hydraulic fracturing in horizontal wells. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*. 2013; 12(6):101-110. EDN SGLWOD. (rus.).
26. Zakharov S.V., Radchenko V.G., Semenov Yu.D., Sulimov V.S., Smolenkov V.Yu., Taimaskhanov A.M. Method of jet grouting in hydraulic engineering construction. *Hydraulic Engineering*. 2008; 4:2-11. EDN IUKJHP. (rus.).
27. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Strengthening weak soils in the basis of foundation slabs with

use of technology of jet grouting. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-2:310-315. EDN RTSQUJ. (rus.).

28. Shishkin V.Ya., Pogorelov A.E. The use of jet geotechnology in the reconstruction of objects in urban areas. *Integral*. 2011; 3:124-128. (rus.).

29. Grishko D.A., Shuplik M.N., Kulikova E.Yu. Prospects for the use of jet grouting in urban underground construction in order to reduce environmental risks. *Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*. 2011; 9:16-22. EDN OCBUTD. (rus.).

30. Kim D., Lai H.T., Chilingar G.V., Yen T.F. Geopolymer formation and its unique properties. *Environmental Geology*. 2006; 51(1):103-111. DOI: 10.1007/s00254-006-0308-z

31. Izquierdo M., Querol X., Davidovits J., Antenucci D., Nugteren H., Fernández-Pereira C. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 166(1):561-566. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.063

32. Glasko A.V., Kalmykov A.M., Mesherin I.V., Fedotov A.A., Hrapov P.V. Foundation soil freezing of geotechnical objects in cryolithozone by means of vertical thermal stabilizers. *Bulletin of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman*. 2012; 7(7):33. EDN QIUPHD. (rus.).

33. Abramova T.T. Silicatization of structurally unstable soils (part 1). *Engineering Geology*. 2017; 6:34-45. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-6-34-45. EDN QILWRZ. (rus.).

34. Petrenko E.N. *Integrated ecological system for assessing and eliminating technogenic hydrocarbon deposits : dis. ... cand. tech. sciences*. Samara, 2022; 122. (rus.).

35. Ksenofontov B.S. *Purification of water and soil by flotation : monograph*. Moscow, New technologies, 2004; 224. EDN QNKPDH. (rus.).

36. Galeev R.G., Kuptsov A.V., Gimaev R.N., Telyashev V.G. Flocculants for separating oil sludge from refineries. *Water: Ecology and Technology: III International Congress*. 1998; 382. (rus.).

37. Deryagin B.V., Churaev M.V., Muller V.M. *Surface forces*. Moscow, Nauka Publ., 1985; 3. (rus.).

38. Valiullina A.U., Shamsutdinova L.R., Khizbullin F.F. Ecological restoration of polluted lands degraded as a result of the activities of chemical industries. *Oil and gas technologies and new materials (problems and solutions)*. 2012; 208-211. EDN ULLKJX. (rus.).

39. Ghareeb M. Measuring soil temperature at different depths. *Innovative Scientific Research*. 2021; 3-2(5):15-23. DOI: 10.5281/zenodo.4677319. EDN AWKBVU. (rus.).

40. Chernysh A.S., Gubarev S.A. Accounting for the rheological features of the soil. *Vector of Geosciences*. 2018; 1(1):5-7. EDN XREADB. (rus.).

41. Patent RU No. 2752983 C1. *Method of cleaning oil-contaminated soil using high-pressure technology* / O.V. Tupitsyna, K.L. Chertes, V.N. Pystin, E.N. Petrenko, A.A. Bukin, D.N. Sherstobitov, D.E. Bykov, G.G. Gilayev; application No. 2020135452 dated 10/27/2020, publ. 11/08/2021.

Received March 13, 2023.

Adopted in revised form on April 25 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES: Konstantin L. Chertes** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

**Aleksey A. Bukin** — postgraduate student; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 1161685; alkatras\_b@mail.ru;

**Nikolai S. Bukhman** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 27408; physics@samgtu.ru;

**Vitaliy N. Pystin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; Vitaliy.pystin@yandex.ru;

**Artem P. Seyanko** — student; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8360-4138; artem-seyanko@mail.ru;

**Olga V. Tupitsyna** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SSTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; Olgatupicyna@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that they have no conflicts of interest.*

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626:627

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1104-1113

## Анализ методов расчета устойчивости ячеистых конструкций

Егор Максимович Терихов, Александр Сергеевич Аншаков

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ячеистые конструкции широко применяются в мировой практике при решении различных задач. С помощью подобных конструкций возводятся причальные и оградительные сооружения, а также перемычки, позволяющие осушить территорию ниже уровня воды для последующего строительства основных сооружений насухо. В отечественной практике эти сооружения зачастую производятся из шпунтовых профилей с большими моментами инерции и моментами сопротивлений в составе заанкерowanych или взаимозаанкерowanych тонких стенок. Такое конструктивное решение при значительных глубинах воды требует использования шпунтовых профилей большой мощности и серьезных анкерных устройств, что повышает металлоемкость сооружения. Для временных сооружений существенные материалоемкость и трудозатраты нежелательны. Ячеистые конструкции состоят из плоского шпунта, полости между которыми заполняются грунтом.

**Материалы и методы.** Осуществлены различные проверки устойчивости варианта ячеистой конструкции, выполненные в соответствии с действующими нормативными документами, также использованы рекомендации к проектированию данных конструкций европейской компании ArcelorMittal, которая имеет обширный опыт проектирования реализованных проектов сооружений с применением данного технического решения. Полученные результаты показателя устойчивости сравниваются с результатом расчета конечно-элементной модели, проведенного в расчетном комплексе MIDAS FEA NX.

**Результаты.** На основе расчета трехмерной модели ячеистой конструкции выполнено сравнение с аналитическими методами расчетов устойчивости. Аналитический расчет устойчивости по схеме глубинного сдвига в соответствии с нормативными документами имеет как близкую сходимость коэффициента устойчивости, так и потенциальную поверхность потери устойчивости в сравнении с задачей метода конечных элементов в трехмерной постановке.

**Выводы.** Для расчета устойчивости ячеистых конструкций главным ограничивающим фактором в расчетах выступает коэффициент устойчивости по схеме глубинного сдвига.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ячеистые конструкции, расчет устойчивости, МКЭ, MIDAS FEA NX, статические расчеты, шпунт, метод конечных элементов, поверхность обрушения, коэффициент устойчивости

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Терихов Е.М., Аншаков А.С. Анализ методов расчета устойчивости ячеистых конструкций // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1104–1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1104-1113

*Автор, ответственный за переписку:* Егор Максимович Терихов, terikhovegor@mail.ru.

## Analysis of methods for calculating the stability of cellular structures

Egor M. Terikhov, Aleksandr S. Anshakov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Cellular structures are widely used in world practice to solve various problems. By means of such structures mooring and barrier constructions, and also the cofferdams are erected which allow to drain territory below a water level for the subsequent construction of the main structures on dry land. In domestic practice, these structures are often made of sheet piling profiles with high moment of inertia and moment of resistance as a part of anchored or interanchored thin walls. This design solution requires heavy-duty sheet piling sections and heavy anchoring devices at considerable water depths, which increases the steel intensity of the structure. For temporary structures the material and labor-intensive nature of the structure is undesirable. The honeycomb construction consists of flat sheet piles with cavities filled with soil.

**Materials and methods.** Various stability tests of the cellular structure variant have been carried out in accordance with the current regulatory documents; recommendations for the design of these structures by the European company ArcelorMittal, which has extensive experience in designing realized projects of structures using this technical solution, have also been used. The stability indicator results are compared with the results of finite-element model calculations performed in the MIDAS FEA NX calculation complex.

**Results.** Based on the calculation of a three-dimensional model of a cellular structure, a comparison was made with analytical methods for calculating stability. The analytical calculation of stability according to the deep shear scheme in accordance

with current regulations has both a close convergence of the stability coefficient and a potential buckling surface in comparison with the FEM problem in a three-dimensional formulation.

**Conclusions.** The main limiting factor in calculations of stability of cellular structures is the stability coefficient according to the scheme of deep shear.

**KEYWORDS:** cellular structures, stability analysis, FEM, MIDAS FEA NX, static calculations, sheet pile, finite element method, failure surface, stability coefficient

**FOR CITATION:** Terikhov E.M., Anshakov A.S. Analysis of methods for calculating the stability of cellular structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1104-1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1104-1113 (rus.).

*Corresponding author:* Egor M. Terikhov, terikhovegor@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Ячеистые конструкции широко применяются в мировой практике при решении различных задач. С использованием подобных конструкций возводятся причальные и оградительные сооружения [1–12], а также перемычки [13–17], позволяющие осушить территорию ниже уровня воды для последующего строительства основных сооружений насухо [18–22]. В отечественной практике данные сооружения зачастую производятся из шпунтовых профилей с большими моментами инерции и моментами сопротивлений в составе заанкерowanych или взаимозаанкерowanych тонких стенок. Такое конструктивное решение при значительных глубинах воды требует использования шпунтовых профилей большой мощности и серьезных анкерных устройств, что повышает металлоемкость сооружения. Для временных сооружений существенные металлоемкость и трудозатраты нежелательны. Ячеистые конструкции состоят из плоского шпунта, полости между которыми заполняются грунтом. Для погружения плоского шпунта не требуется мощного оборудования, так как шпунтовая свая имеет малый вес и малые площадь поперечного сечения и периметр. После забивки отдельного контура возможна засыпка отдельной ячейки на полную высоту, потому работы можно вести параллельно. Причинами редкого применения ячеистых конструкций могут служить два фактора. Во-первых, в нормативной документации критически мало информации для проектирования таких сооружений, они лишь кратко упоминаются в СП<sup>1</sup>, где в качестве оценочной характеристики представлена проверка устойчивости по проскальзыванию замков на оси сооружения. Во-вторых, плоские шпунтовые сваи не производятся отечественными заводами, из-за чего приходится пользоваться сваями европейского или китайского производства. При условии появления методик расчета данных конструкций, описывающих в достаточной мере работу сооружения и включения их в нормативные документы, опираясь на иностранный опыт, можно говорить, что в российском проектировании появится прогрессивное решение с ма-

<sup>1</sup> СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства.

лой материалоемкостью и хорошими показателями устойчивости и долговечности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе произведены различные проверки устойчивости варианта ячеистой конструкции, выполненные в соответствии с нормативными документами<sup>2, 3, 4, 5</sup>, также использованы рекомендации к проектированию таких конструкций европейской компании ArcelorMittal<sup>6</sup>, которая имеет обширный опыт проектирования реализованных проектов сооружений с применением данного технического решения. Полученные результаты показателя устойчивости сравниваются с результатом расчета конечно-элементной модели, осуществленного в расчетном комплексе MIDAS FEA NX, приведен наиболее приближенный к численному решению аналитический расчет. Такой подход широко применяется при проектировании и оценке устойчивости шпунтовых конструкций в гидротехническом строительстве [23–25].

MIDAS FEA NX — программа, специально разработанная для моделирования взаимодействий между сооружениями и их основаниями на основе метода конечных элементов. FEA NX позволяет выполнить пошаговые расчеты устройства выемок, насыпей, возведения сооружений, загрузки и других воздействий, оказывающих непосредственное влияние на проектирование и строительство.

К исследованию принята цилиндрическая ячеистая конструкция сооружения перемычки из шпунта AS 500-9.5. Так как российских нормативов и сортов на конструкции данного типа не разработано, использован сортмент компании ArcelorMittal. Характерные размеры конструкции

<sup>2</sup> СП 16.13330.2017. Стальные конструкции.

<sup>3</sup> СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

<sup>4</sup> СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения.

<sup>5</sup> СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.

<sup>6</sup> Arcelor Mittal Piling Handbook, 9th ed.

приведены на рис. 1, а сечение принятого в расчетах шпунта на рис. 2.

В качестве расчетных геометрических размеров по сортаменту приняты:

$$W_e = 17,80 \text{ м}, x = 25,48 \text{ м}, r_a = 20,49 \text{ м},$$

$$r_m = 4,22 \text{ м}, d_y = 0,43 \text{ м}.$$

Сооружение представляет собой перемышку, возводимую с воды. После забивки шпунта и заполнения ячеек конструкции грунтом засыпки с одной стороны производится выемка грунта основания с последующим осушением котлована. Таким образом сооружение воспринимает напор воды со стороны акватории и давление грунта.

Расчетное сечение приведено на рис. 3.

Твердотельный грунт в расчетной модели выполнен из трехмерных элементов в форме тетраэдров и гексаэдров с 4 и 5 узлами соответственно с помощью модели материала Мора – Кулона. Плоский шпунт ячеек изготовлен из двухмерных элементов оболочки прямоугольной формы (с 4 узлами) с применением линейно-упругой модели материала. Для моделирования контакта шпунта с грунтом использовались элементы интерфейса, применяемые программой для моделирования взаимодействия между поверхностями или линиями разграничения. Для задания прочностных параметров контакта использовался коэффициент понижения 0,33 от значений прочностных характеристик грунта.

В качестве нагрузок в расчетной модели применялись давление воды на поверхность и нагрузка от собственного веса. В модели задавались граничные условия по перемещениям и поровому давлению. Граничные условия по перемещениям заданы одноузловыми связями на границах расчетной модели. Граничные условия порового давления задавались одноузловыми связями с указанием уровня воды в модели. В последней расчетной фазе для моделирования водопонижения на поверхности дна котлована задавалось нулевое значение порового давления.

С целью упрощения расчетной схемы для моделирования грунта основания и засыпки использовались одинаковые характеристики. Характеристики применяемых в модели материалов приведены в таблице.

Длина и глубина погружения шпунта, глубина котлована в расчетной модели соответствуют рис. 3, высота основания составляет 40 м. Размеры модели в плане 140 × 102 м. Общий вид конечно-элементной модели приведен на рис. 4. В составе модели 99 027 трехмерных элементов, моделирующих грунт; 8464 двухмерных элементов, моделирующих шпунтовое ограждение; 13 392 интерфейсных элемента и 13 467 одномерных элементов жестких связей. Суммарно в модели 91 474 узла, 120 883 элемента, 300 486 степеней свободы.

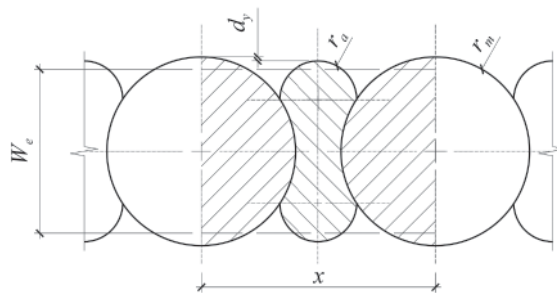


Рис. 1. Основные размеры конструкции ячеистой цилиндрической перемышки:  $W_e$  — эквивалентная (расчетная) ширина;  $x$  — длина одной составной части системы;  $r_a$  — радиус дуги соединительной ячейки;  $r_m$  — радиус основной ячейки;  $d_y$  — отступ в плане квадранта основной ячейки от квадранта дуги соединительной ячейки

Fig. 1. The main dimensions of the structure of a cellular cylindrical bulkhead:  $W_e$  — equivalent (design) width;  $x$  — length of one system;  $r_a$  — radius of the connecting cell arc;  $r_m$  — radius of the main cell;  $d_y$  — offset in the plane of the main chamber quadrant from the arc quadrant of the connecting chamber

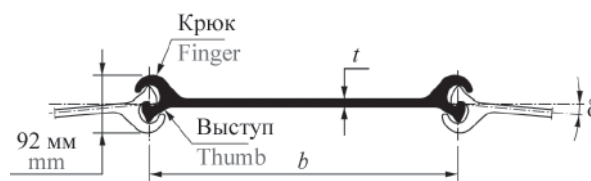


Рис. 2. Сечение шпунта AS 500-9.5:  $t = 9,5 \text{ мм}$ ;  $b = 500 \text{ мм}$

Fig. 2. Characteristics of AS 500-9.5 straight-web sheet piles cross section:  $t = 9.5 \text{ mm}$ ;  $b = 500 \text{ mm}$

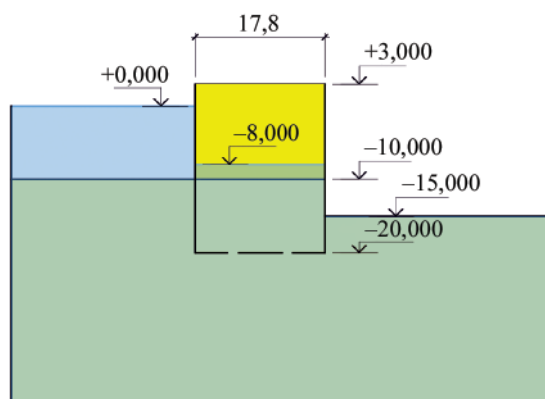


Рис. 3. Расчетное сечение

Fig. 3. Calculated cross-section

Характеристики материалов

Material properties

Наименование материала Material name	Модель материала Material model	Модуль упругости $E$ , МПа Elastic modulus $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона $\nu$ Poisson's ratio $\nu$	Удельный вес сухого материала $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup> Unit weight $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	Удельный вес в водонасыщенном состоянии $\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup> Unit weight (saturated) $\gamma_{sat}$ , kN/m <sup>3</sup>	Коэффициент пористости $e$ Void ratio $e$	Удельное сцепление $c$ , кПа Cohesion $c$ , kPa	Угол внутреннего трения $\varphi$ , ° Frictional angle $\varphi$ , °
Песок Sand	Модель Мора – Кулона Mohr – Coulomb	34	0,3	17	18	0.5	0	31
Сталь Steel	Упругая модель Elastic	210 000	0,3	76,5	–	–	–	0

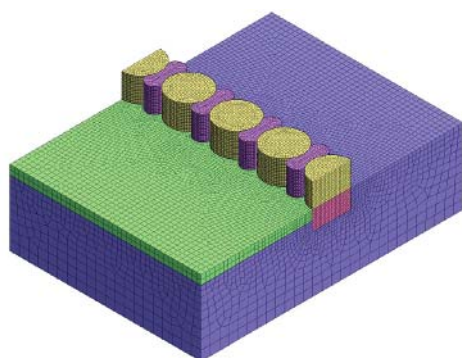


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной расчетной модели

Fig. 4. General view of the finite element calculation model

Расчет конечно-элементной модели в трехмерной постановке производился с учетом стадий возведения, приведенных на рис. 5.

Для определения расчетного коэффициента устойчивости использовался метод понижения прочностных характеристик (strength reduction method), суть которого состоит в последовательном понижении прочностных характеристик материалов расчетной модели. Если в процессе расчета итерации система находится в равновесии, начинается следующая итерация. Коэффициент устойчивости равен понижающему коэффициенту прочностных характеристик материалов в последней сошедшей итерации решения.

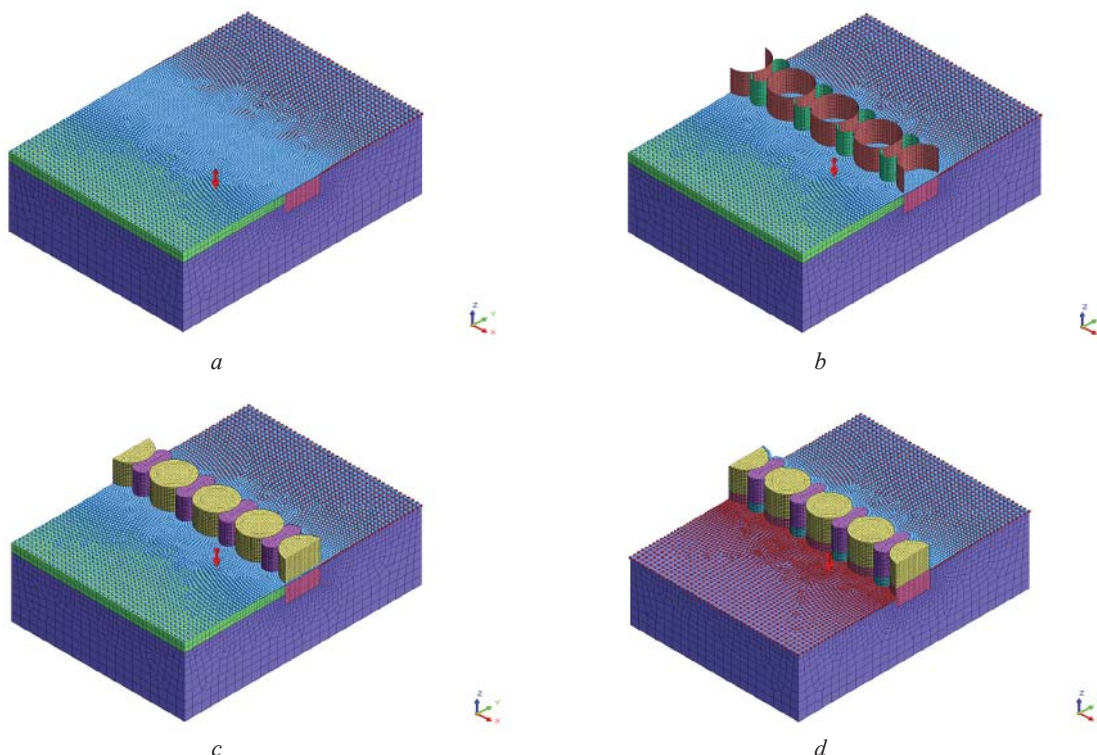


Рис. 5. Фазы расчета: *a* — исходные условия; *b* — забивка шпунта; *c* — заполнение ячеек грунтом; *d* — выемка грунта и водопонижение

Fig. 5. Calculation phases: *a* — initial conditions; *b* — pile driving; *c* — filling cells with soil; *d* — excavation and water drawdown

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета перемещений на последней стадии приведены на рис. 6. Максимальные горизонтальные перемещения составили 19,84 см, максимальные вертикальные перемещения — 19,40 см, что для ограждения котлована является допустимым. Результаты расчета усилий приведены на рис. 7, 8. Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу — на рис. 9.

Как видно из результатов расчета усилий, на стадии экскавации усилия максимальные.

Из рис. 9 очевидно, что шпунт для сооружения должен иметь расчетное сопротивление не менее 320 МПа, в соответствии с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» необходимо применять сталь С345Б, согласно рекомендациям ArcelorMittal — S 320GP.

В результате фильтрационных расчетов получен уровень воды в ячейке на отметке ~8,00 м, распределение порового давления приведено на рис. 10.

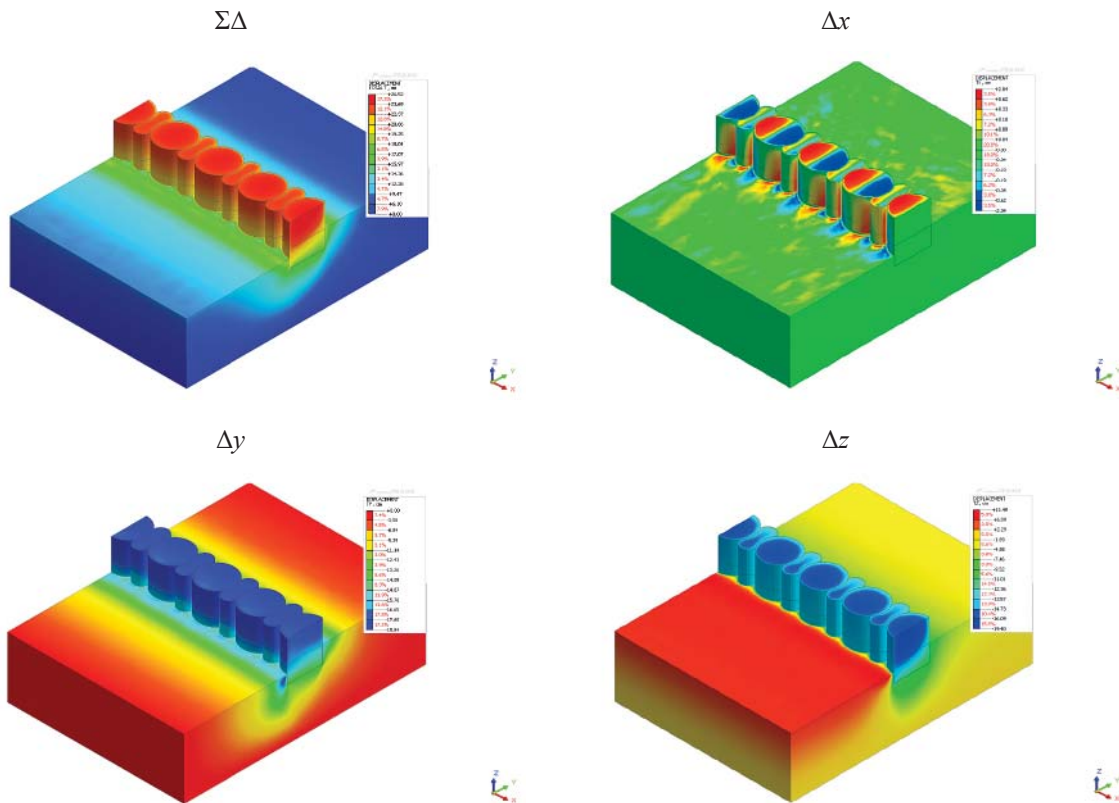


Рис. 6. Результаты расчета перемещений

Fig. 6. Results of displacement calculation

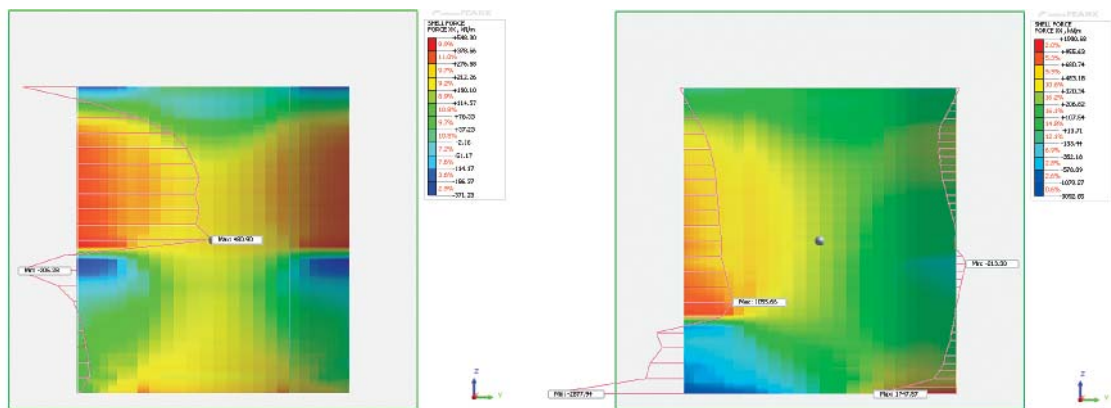


Рис. 7. Горизонтальные усилия в оболочке на стадиях засыпки и выемки котлована с осушением

Fig. 7. Shell horizontal forces at the stages of backfilling and excavation of the pit with drainage

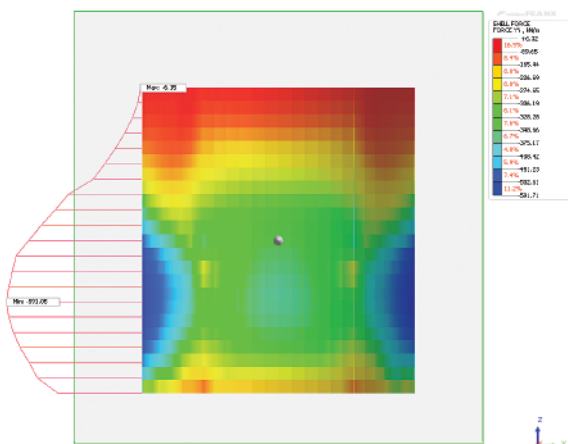


Рис. 8. Вертикальные усилия в оболочке на стадиях засыпки и выемки котлована с осушением

Fig. 8. Shell vertical forces at the stages of backfilling and excavation of the pit with drainage

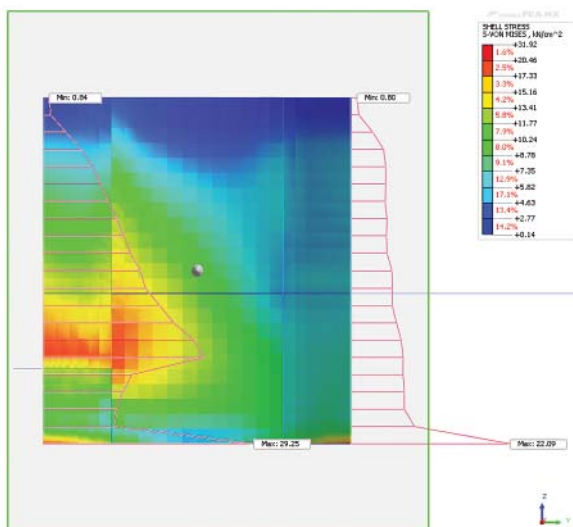
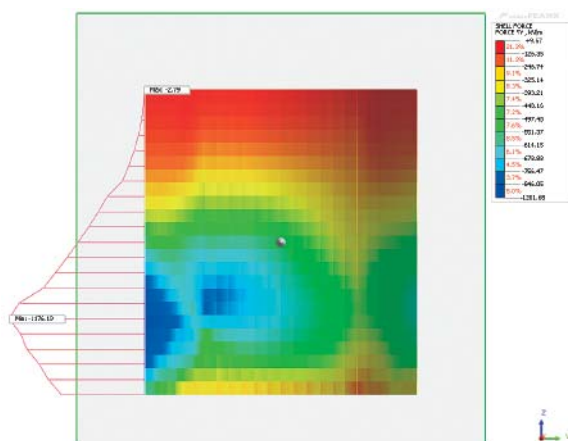


Рис. 9. Эквивалентные напряжения по Мизесу в оболочке на последней стадии расчета

Fig. 9. Equivalent Mises stresses in the shell at the last stage of calculation

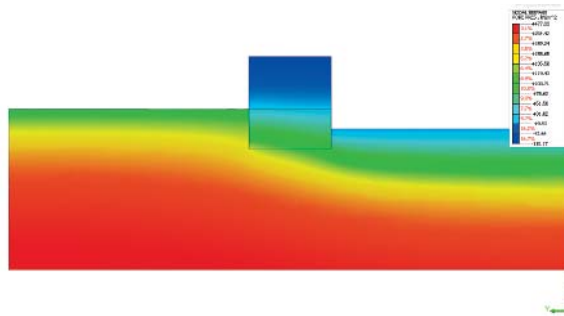


Рис. 10. Распределение порового давления

Fig. 10. Pore pressure distribution

По окончании последней фазы расчета произведено определение коэффициента устойчивости методом понижения прочностных характеристик (strength reduction method). Коэффициент устойчивости в результате расчета составил 1,932. Полученная в итоге расчета поверхность обрушения представлена на рис. 11.

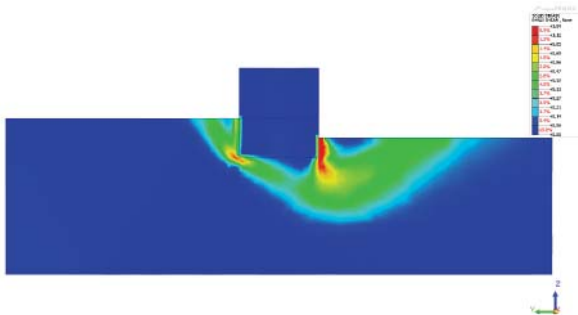


Рис. 11. Распределение сдвиговых деформаций на последней итерации расчета устойчивости

Fig. 11. Distribution of shear deformations in the last iteration of the stability calculation

Форма поверхности обрушения представляет собой потерю устойчивости по схеме глубинного сдвига. Расчет устойчивости по данной схеме для гидротехнических сооружений в нормативной документации представлен в СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений». Результатом данного расчета является график несущей способности основания — зависимость предельного сдвигающего усилия на единицу расчетной ширины подошвы сооружения от вертикального усилия на единицу расчетной ширины подошвы сооружения.

Расчетная схема не подразумевает значительного погружения расчетного сооружения, для учета боковое давление грунта со стороны моря входит в сдвигающее усилие, а грунт выше отметки погружения шпунта со стороны котлована учитывается за счет введения дополнительной вертикальной распределенной нагрузки на сдвигающееся тело.

Расчетная схема с приведенной на ней потенциальной поверхностью обрушения с наименьшей несущей способностью приведена на рис. 12. График несущей способности основания показан на рис. 13.

В результате аналитического расчета коэффициент устойчивости составил 1,82.

Итоги проведенных расчетов показывают, что сооружение соответствует требованиям прочности и устойчивости.

Сравнение графических результатов устойчивости, полученных численным и аналитическим методами, путем наложения друг на друга приведено на рис. 14.

Как видно из рис. 14, характер потери устойчивости, полученный численным и аналитическим методом, довольно схож, однако коэффициент устойчивости и характерные размеры сдвигающегося тела несколько отличаются.

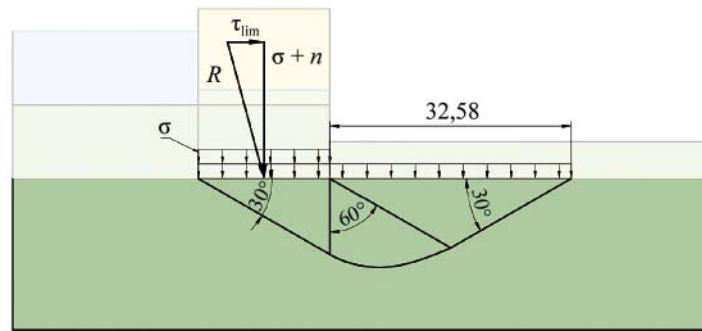


Рис. 12. Потенциальная поверхность обрушения с наименьшей несущей способностью

Fig. 12. Potential collapse surface with the lowest bearing capacity

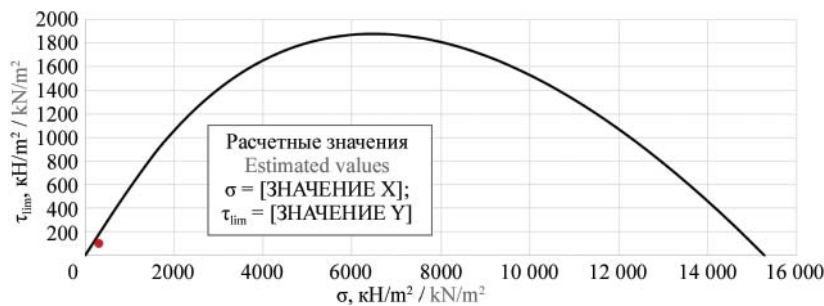


Рис. 13. График несущей способности основания

Fig. 13. Graph of the bearing capacity of the base

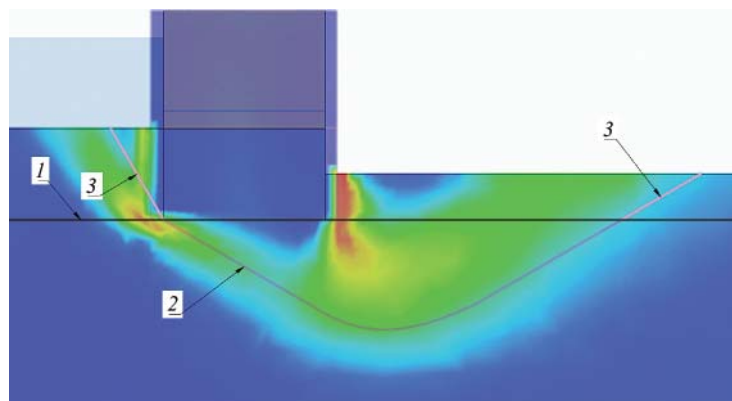


Рис. 14. Наложение полученных очертаний сдвигающегося тела: 1 — граница расчетной схемы при аналитическом расчете; 2 — поверхность потери устойчивости, полученная аналитическим расчетом; 3 — предполагаемое из допущений расчета продолжение поверхности потери устойчивости

Fig. 14. Imposition of the resulting outlines of the shifting body: 1 — the boundary of the calculation scheme in analytical calculation; 2 — stability loss surface obtained by analytical calculation; 3 is the expected continuation of the stability loss surface from the assumptions of the calculation

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для заданных параметров сооружения по результатам сравнения расчета устойчивости методом конечных элементов и аналитических расчетов, приведенных в нормативной литературе, потеря устойчивости по схеме глубинного сдвига наиболее близко описывает работу конструкции. При проектировании в первом приближении ячеистых конструкций переемычек стоит ориентироваться на результаты аналитического расчета устойчивости по данной схеме.

Тем не менее аналитические расчеты на данный момент не могут обеспечить требуемой сходимости результатов расчета с трехмерной моделью. Разница в полученных результатах обуславливается принятыми для аналитического расчета допущениями, в том числе геометрическими, так как яче-

истые сооружения являются пространственными конструкциями из шпунта малой жесткости, заполненными грунтом без днища, которые в аналитических расчетах представляются сплошным недеформируемым твердым телом.

Несомненно, при изменении нагрузок или в других условиях строительства напряженно-деформированное состояние сооружения может отличаться от результатов, приведенных в этой статье. В дальнейшем следует произвести более обширные исследования конструкции, варьируя параметры, такие как: диаметр ячеек, глубина погружения шпунта, наличие или отсутствие перепада уровней воды, характеристики грунтов и наличие нескольких слоев грунта.

Дальнейшие исследования позволят усовершенствовать аналитические расчеты в случае ячеистых конструкций, что облегчит их проектирование.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Левачев С.Н., Корчагин Е.А., Пиляев С.И., Кантаржи И.Г., Шурухин Л.А. Порты и портовые сооружения : учебное издание. М. : Изд-во АСВ, 2015. 536 с.
2. Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R. Cellular Pier rehabilitation design // Ports 2022. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012
3. Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M. Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed // Ocean Engineering. 2022. Vol. 246. P. 110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626
4. Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G. Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay // Applied Ocean Research. 2022. Vol. 119. P. 103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022
5. Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y. Resistance to skirt-tip with external bevels of suction caissons penetrating clay // Ocean Engineering. 2022. Vol. 249. P. 110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909
6. Song L., Zhao H., Li J., Yang Q. Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay // Applied Ocean Research. 2022. Vol. 119. P. 103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032
7. Xiao Z., Song L., Li J. Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study // Applied Ocean Research. 2020. Vol. 97. P. 102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092
8. Dağlı B.Y., Yiğit M.E., Gökkuş Ü. Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to wave loads // TEM Journal. 2020. Vol. 6. Issue 3. Pp. 550–557. DOI: 10.18421/TEM63-16
9. Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load // Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. 2010. Vol. 31. Issue 8. Pp. 2648–2654.
10. Kim J., Jeong Y.J., Park M.S. Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2017. Vol. 7. Issue 9. Pp. 334–340.
11. Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure // Open Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 08. Issue 04. Pp. 555–569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040
12. Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2018. Vol. 07. Issue 11. DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103
13. Gahlot R., John R., Zemse R. Cofferdams-forces analysis and design criteria // International Journal of Engineering Research and Science. 2014. Vol. 5. Issue 12.
14. Ciammaichella M., Tantalla J. Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project // Proceedings of HydroVision. 2014. Pp. 2–7.
15. Weinmann T., Nyren R., Marr W.A. Exposure of deep foundations for the Kentucky lock addition project // IFCEE 2015. 2015. DOI: 10.1061/9780784479087.234
16. Bittner R., Kirk N. Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles // Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations. 2014.
17. Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes.

Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. Virginia Department of Transportation. 2013.

18. Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S. Extended “Mononobe-Okabe” method for seismic design of retaining walls // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2013/136132

19. Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis // *Geomorphology*. 2015. Vol. 246. Pp. 729–750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010

20. Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L. Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides) // 17th International River symposium: ExcellenceCollaboration-Integration. 2014. Pp. 1–8.

21. Rose A.T. Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching // 7th Interna-

tional Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Scholars’ Min 46. 2013.

22. Mohan R., Doody J.P., Patmont C., Gardner R., Shellenberger A. Review of Environmental Dredging in North America: Current Practice and Lessons Learned // *Journal of Dredging (Official Journal of the Western Dredging Association)*. 2016. Vol. 15. No. 2. Pp. 29–50.

23. Saba M.R., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program // *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 122–132.

24. Prasetyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures // 2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition. 2018.

25. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability Analysis of Cellular Retaining Structure by PLAXIS Finite Element Code // *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2018. Special Issue (D).

Поступила в редакцию 17 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Егор Максимович Терихов — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

Александр Сергеевич Аншаков — кандидат технических наук, преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Levachev S.N., Korchagin E.A., Pilyaev S.I., Cathargy I.G., Shurukhin L.A. *Ports and Port Facilities: Educational Edition*. Moscow, ASV Publishing House, 2015; 536. (rus.).

2. Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R. Cellular Pier rehabilitation design. *Ports 2022*. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012

3. Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M. Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed. *Ocean Engineering*. 2022; 246:110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626

4. Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G. Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022

5. Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y. Resistance to skirt-tip with external bevvels of suction caissons pen-

etrating clay. *Ocean Engineering*. 2022; 249:110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909

6. Song L., Zhao H., Li J., Yang Q. Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032

7. Xiao Z., Song L., Li J. Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study. *Applied Ocean Research*. 2020; 97:102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092

8. Dağlı B.Y., Yiğit M.E., Gökkuş Ü. Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to wave loads. *TEM Journal*. 2020; 6(3):550-557. DOI: 10.18421/TEM63-16

9. Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010; 31(8):2648-2654.

10. Kim J., Jeong Y.J., Park M.S. Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2017; 7(9):334-340.
11. Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure. *Open Journal of Civil Engineering*. 2018; 08(04):555-569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040
12. Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018; 07:11. DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103
13. Gahlot R., John R., Zemse R. Cofferdams-forces analysis and design criteria. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2014; 5(12).
14. Ciammaichella M., Tantalla J. Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project. *Proceedings of HydroVision*. 2014; 2-7.
15. Weinmann T., Nyren R., Marr W.A. Exposure of deep foundations for the Kentucky lock addition project. *IFCEE 2015*. 2015. DOI: 10.1061/9780784479087.234
16. Bittner R., Kirk N. Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles. *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*. 2014.
17. *Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes*. Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. Virginia Department of Transportation. 2013.
18. Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S. Extended “Mononobe-Okabe” Method for Seismic Design of Retaining Walls. *Journal of Applied Mathematics*. 2013; 2013:1-10. DOI: 10.1155/2013/136132
19. Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*. 2015; 246:729-750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010
20. Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L. Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides). *17th International River symposium: ExcellenceCollaboration-Integration*. 2014; 1-8.
21. Rose A.T. Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching. *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Scholars' Min* 46. 2013.
22. Mohan R., Doody J.P., Patmont C., Gardner R., Shellenberger A. Review of environmental dredging in North America: Current practice and lessons learned. *Journal of Dredging (Official Journal of the Western Dredging Association)*. 2016; 15(2):29-50.
23. Saba M.R., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*. 2014; 22(1):122-132.
24. Prasetyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures. *2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition*. 2018.
25. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability analysis of cellular retaining structure by PLAXIS finite element code. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2018; Special Issue (D).

Received April 17, 2023.

Adopted in revised form on April 25 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES:** **Egor M. Terikhov** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

**Aleksandr S. Anshakov** — Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Уменьшение теплопоступления в зданиях за счет искусственного понижения температуры наружного воздуха путем испарительного охлаждения

Сирануш Мельсиковна Эгнатосян<sup>1</sup>, Наира Мельсиковна Эгнатосян<sup>1,2</sup>,  
Лусине Артуровна Ерицян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный университет архитектуры и строительства Армении (НУАСА);  
г. Ереван, Республика Армения;

<sup>2</sup> Институт геологических наук Национальной академии наук Армении (ИГН НАН РА);  
г. Ереван, Республика Армения

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Системами обеспечения микроклимата зданий потребляется значительное количество природных энергоресурсов. По статистическим данным на нужды отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха используется 40 % энергии. Данная проблема непосредственно связана с тепловой и охлаждающей нагрузкой здания, т.е. зависит от теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и тепловой защиты здания.

**Материалы и методы.** Для понижения потребления энергоресурсов наиболее распространенный метод — это теплоизоляция ограждающих конструкций, повышение теплового сопротивления ограждающих конструкций, что является сложной теплотехнической задачей. Рассмотрен альтернативный новый метод снижения теплопоступления в здания за счет испарительного охлаждения наружного воздуха, что приводит к понижению охлаждающей нагрузки здания и впоследствии влияет на сокращение выбросов парниковых газов. С этой целью на южной стене здания устанавливается форсуночная система орошения наружного воздуха, вследствие чего понижается условная температура пограничного слоя, которая формируется в результате воздействия солнечной радиации.

**Результаты.** Предложенный метод пассивно понижает температуру пограничного слоя, которая стремится к температуре мокрого термометра, в результате уменьшается теплопоступление в здание, что приводит к понижению охлаждающей нагрузки, и увеличивается энергоэффективность системы.

**Выводы.** Зеленая архитектура и проектирование зданий с нулевым потреблением энергоресурсов актуальны и имеют важное значение в настоящее время. Мировая статистика показывает, что в зданиях используется 14 % всех запасов питьевой воды, с целью экономичного применения питьевой воды в предложенной системе устанавливается резервуар накопления дождевой воды для орошения наружного воздуха. Сравнительный анализ показал, что за счет охладительного испарения и искусственного понижения температуры наружного воздуха уменьшается охлаждающая нагрузка здания на 20 %, которая приводит к сокращению выбросов парниковых газов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** испарительное охлаждение, адиабатическое увлажнение, температура мокрого термометра, охлаждающая нагрузка, энергоэффективность здания, парниковые газы, температура пограничного слоя, интенсивность солнечной радиации, форсунки орошаемой воды

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Эгнатосян С.М., Эгнатосян Н.М., Ерицян Л.А. Уменьшение теплопоступления в зданиях за счет искусственного понижения температуры наружного воздуха путем испарительного охлаждения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1114–1122. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1114-1122

Автор, ответственный за переписку: Сирануш Мельсиковна Эгнатосян, siranushegnatosyan@gmail.com.

## Reducing heat gain in buildings by artificially lowering the outside air temperature through evaporative cooling

Siranush M. Egnatosyan<sup>1</sup>, Naira M. Egnatosyan<sup>1,2</sup>, Lusine A. Yeritsyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Architecture and Construction of Armenia (NUACA); Yerevan, Republic of Armenia;

<sup>2</sup> Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (IGS NAS RA);  
Yerevan, Republic of Armenia

### ABSTRACT

**Introduction.** Systems for microclimate regulation in buildings consume a large amount of natural energy resources. Statistics show that 40 % of energy is used for heating, ventilation and air conditioning. This problem is directly related to the heating and cooling load of the building, i.e. it depends on the thermal engineering characteristics of building envelopes and the thermal protection of the building.

**Materials and methods.** To reduce the consumption of energy resources, the most common method is the thermal insulation of enclosing structures, increasing the thermal resistance of enclosing structures, which is a complicated thermal engineering problem. An alternative new method of reducing heat gain into buildings through evaporative cooling of outside air which leads to reduction of cooling load of building and subsequently influences the reduction of greenhouse gas emissions is considered. For this purpose, a spray irrigation system is installed on the southern wall of the building to lower the conditional boundary layer temperature which is formed as a result of solar radiation.

**Results.** The suggested method passively reduces the boundary layer temperature, which tends to the temperature of the wet-bulb thermometer, as a result, the heat influx into the building is reduced, which leads to a lower cooling load and increases the energy efficiency of the system.

**Conclusions.** Green architecture and zero-energy building design are relevant and important at the present time. World statistics show that 14 % of all potable water is used in buildings, in order to use potable water economically the proposed system installs a rainwater accumulation tank for outdoor irrigation. A comparative analysis showed that by cooling evaporation and artificially lowering the outside air temperature, the cooling load of the building is reduced by 20 %, which results in a reduction of greenhouse gas emissions.

**KEYWORDS:** evaporative cooling, adiabatic humidification, wet-bulb temperature, cooling demand, building energy efficiency, greenhouse gases, boundary layer temperature, solar intensity, spray water nozzles

**FOR CITATION:** Egnatosyan S.M., Egnatosyan N.M., Yeritsyan L.A. Reducing heat gain in buildings by artificially lowering the outside air temperature through evaporative cooling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1114-1122. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1114-1122 (rus.).

*Corresponding author:* Siranush M. Egnatosyan, siranushegnatosyan@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Поддержание комфортного микроклимата в помещениях и снижение энергозатрат на нужды отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха являются сложными задачами. В зависимости от региона, а также от назначения здания система охлаждения с применением холодильной системы потребляет большое количество электрической энергии. Для охлаждения помещений на протяжении веков применяли различные методы испарительного охлаждения. В Персии (Иран) использовали так называемые системы охлаждения «ловец ветра» [1]. На крыше здания устанавливали ветряной вал, который улавливал ветер, пропускал его через воду и задувал охлажденный воздух во внутренние помещения. Многие из этих зданий имели дворы с большими запасами воды (рис. 1), поэтому, если не было ветра, то в результате естественного процесса испарения воды горячий воздух, поднимаясь вверх, испарял воду из бассейна во дворе, после чего охлажденный воздух проходил через здание [2, 3].

В Индии для охлаждения воздуха в качестве двери использовался каркас, обвитый индийской

кокосовой пальмой, — татти. Сверху двери устанавливалась емкость, которая медленно заполнялась водой за счет капиллярного эффекта в тканях татти. Когда уровень воды достигал определенного значения, емкость опрокидывалась, орошая водой дверь, и возвращалась в исходное состояние. Древние египтяне, греки и римляне использовали мокрый коврик для охлаждения воздуха в помещениях, который вешали над дверями жилища. Воздух, поступающий в помещение, проходил через коврик, охлаждаясь за счет испарения воды.

В наши дни применяют испарительное охлаждение в оросительных камерах систем вентиляции и кондиционирования для тепловлажностной обработки воздуха [4–6]. Различают испарительное охлаждение воздуха прямое, косое и двухступенчатое (прямое и косвенное) [7–9]. Прямое испарительное охлаждение воздуха основано на изохальном процессе и используется в кондиционерах в холодное время года. В теплое время испарительное охлаждение воздуха целесообразно применять в сухих климатических условиях или при незначительном влаговыведении в помещении [10, 11].



Рис. 1. Применение испарительного охлаждения в Персии (a, b) и в Индии (c)

Fig. 1. Application of evaporative cooling in Persia (a, b) and in India (c)

К сожалению, указанные методы не способны уменьшить охлаждающую нагрузку здания, они только влияют на энергоэффективность систем, обеспечивающих микроклимат. Самый распространенный способ для снижения охлаждающей нагрузки — это теплоизоляция ограждающих конструкций, т.е. повышение теплового сопротивления ограждающих конструкций, что является сложной теплотехнической задачей [12]. Авторами настоящего исследования разработан альтернативный новый метод снижения тепlopоступления в здание за счет испарительного охлаждения наружного воздуха, что приводит к понижению охлаждающей нагрузки здания, а впоследствии влияет на сокращение выбросов парниковых газов и т.д.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существует много методов снижения охлаждающей нагрузки здания, но все они связаны с техническими решениями ограждающих конструкций. Мы предлагаем альтернативный новый метод, который заключается в том, чтобы на южной стене здания установить форсуночную систему орошения наружного воздуха, вследствие чего понижается условная температура  $t_{yc}$  пограничного слоя, формирующаяся в результате воздействия солнечной радиации. На рис. 2 представлена принципиальная новая схема испарительного охлаждения для снижения температуры пограничного слоя и охлаждающей нагрузки.

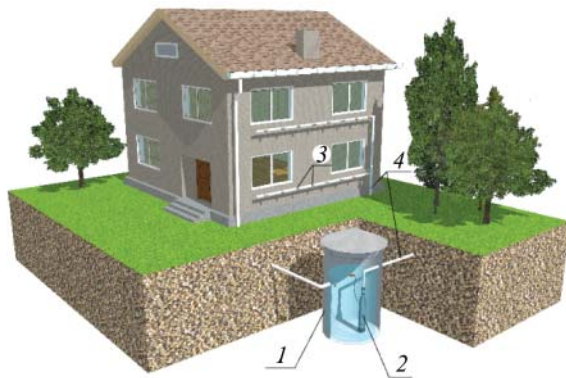


Рис. 2. Новый метод испарительного охлаждения для снижения охлаждающей нагрузки сооружений: 1 — бак для накопления дождевой воды; 2 — насос для подачи воды в форсунки; 3 — форсунки для орошения воды; 4 — подающий трубопровод

Fig. 2. The new method of evaporative cooling for reducing the cooling load of the buildings: 1 — tank for collecting rainwater; 2 — pump for supplying water to nozzles; 3 — nozzles for irrigation water; 4 — water supply pipeline

Вода из бака 1 с помощью насоса 2 под высоким давлением (1,5 до 3 атм) [4] подается в форсунки 3, установленные на южной наружной стене под

окнами. Мельчайшие частицы воды распыляются и поглощаются наружным воздухом, из-за этого происходит испарительное охлаждение или адиабатическое (изохнтальпное) увлажнение. Во время взаимодействия воздуха и воды температура наружного воздуха стремится достичь температуры мокрого термометра. Учитывая термодинамические изменения воздуха, температура пограничного слоя южной конструкции приобретает параметры намного ниже, чем без форсунок. В данной системе немаловажное значение имеет количество орошаемой воды, а также число и конструктивные параметры форсунок. Для сбережения питьевой воды в баке накапливается дождевая вода, которая фильтруется, проходя через гравий.

На рис. 3 показан процесс формирования пограничного слоя возле ограждающей конструкции с учетом воздействия солнечной радиации [12].

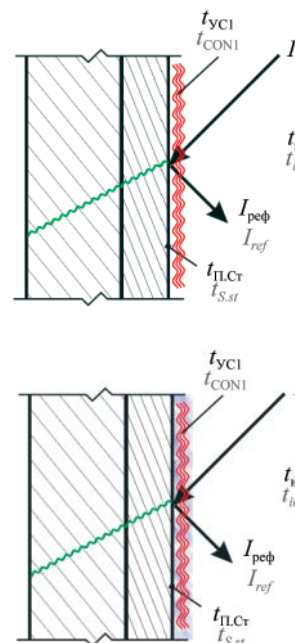


Рис. 3. Процессы поглощения и отражения солнечных лучей на поверхности

Fig. 3. Processes of absorption and reflection of solar rays on the surface

Из рис. 3 видно, что температура пограничного слоя  $t_{yc1}$ ,  $t_{yc2}$  за счет воздействия солнечной радиации выше, чем температура наружного воздуха:

$$t_{yc1} = t_n + t_r \text{ или } t_{yc1} = t_n + \frac{IP}{\alpha_n} \quad (1)$$

$$\text{и } t_{yc2} = t_m + \frac{IP}{\alpha_n},$$

где  $t_n$  — расчетная температура наружного воздуха, °С;  $t_r$  — радиационная температура, °С;  $I$  — интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $P$  — коэф-

коэффициент погашения солнечной радиации (зависит от цвета);  $\alpha_H$  — коэффициент теплоотдачи от стены к воздуху, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $t_M$  — температура мокрого термометра, °С.

Температуру мокрого термометра можно вычислить с помощью формулы (2) [13, 14]:

$$t_M = t_T - \frac{\beta_T (p_H - p_n) r}{\alpha_T \frac{RT_M}{M_B}}, \quad (2)$$

где  $t_T$  — температура воздуха, °С;  $\beta_T$  — коэффициент массоотдачи от воды к воздуху, м/с;  $p_H$  — давление насыщения при температуре мокрого термометра, Па;  $p_n$  — парциальное давление паров воды при температуре воздуха, Па;  $r$  — удельная теплота парообразования воды при температуре мокрого термометра, Дж/кг;  $\alpha_T$  — коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности воды, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T_M$  — абсолютная температура мокрого термометра, К;  $M_B$  — молекулярная масса воды, кг/кмоль.

Температуру мокрого термометра удобно и легко определить, используя *I-d* диаграмму влажного воздуха (рис. 4).

Количество орошаемой воды рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$G_W = \mu G_B, \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент орошения, принимают 0,7 для адиабатического увлажнения воздуха [15];  $G_B$  — количество обрабатываемого воздуха.

Количество форсунок определяют в зависимости от количества орошаемой воды по выражению:

$$n_\Phi = G_W / g_\Phi, \quad (4)$$

где  $g_\Phi$  — производительность одной форсунки, кг/с, зависит от диаметра форсунки  $d_\Phi$  и давления воды  $P_W$ . Зависимость характеристических данных  $g_\Phi = f(d_\Phi; P_W)$  дается производителями в виде формул или графиков.

Охлаждающая нагрузка здания представляет собой сумму теплопритоков через все внешние конструкции ограждающих конструкций плюс внутренние теплопритоки, рассчитывается с помощью следующей суммы:

$$Q_{OH} = \Sigma Q_{T.H} + \Sigma Q_{B.T.B}, \quad (5)$$

где  $\Sigma Q_{T.H}$  — суммарная величина теплопритоков через все наружные конструкции, Вт, определяется суммой:

$$\Sigma Q_{T.H} = \Sigma Q_{T.H.CT} + \Sigma Q_{T.H.OK} + \Sigma Q_{T.H.POT}. \quad (6)$$

Расчет притока тепла через окна  $\Sigma Q_{T.H.OK}$  подобно стенам, солнечная радиация освещает окна разной ориентации в разное время суток. По этой же причине влияние солнечной радиации на теплоприток следует учитывать только для окон, ориентированных на юг. Следовательно, суммарная величина

теплопритоков через все окна дома, включая южное окно, рассчитывается по следующей формуле:

$$\Sigma Q_{T.H.OK} = Q_{T.H.OK}^{IOF} + Q_{T.H.OK}^{AP}, \quad (7)$$

где  $Q_{T.H.OK}^{IOF}$  — теплоприток через южные окна здания, Вт;  $Q_{T.H.OK}^{AP}$  — общий приток тепла через окна дома всех других ориентаций, Вт.

Приток тепла через южные окна  $Q_{T.H.OK}^{IOF}$  происходит за счет теплопередачи  $Q_{OK}^K$ , Вт, и при прямом проникновении солнечной радиации через стеклянные прозрачные поверхности  $Q_{OK}^R$ , Вт.

Тепло, поступающее через южные окна за счет теплопередачи  $Q_{OK}^K$ , Вт, происходит из-за разницы температур наружного и внутреннего воздуха  $t_H - t_B$ . Для этого используется уравнение теплопередачи для окна:

$$Q_{OK}^K = F_{OK}^{IOF} K_{OK} (t_H - t_B). \quad (8)$$

Для расчета притока тепла через южные окна прямым солнечным излучением через стекла  $Q_{OK}^R$ , используется следующее уравнение [12]:

$$Q_{OK}^R = IF_{OK} n_1 n_2 n_3 \beta, \quad (9)$$

где  $I$  — интенсивность солнечной радиации на южной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{OK}$  — площадь оконного проема, м<sup>2</sup>;  $n_1 = 0,8$  — коэффициент отражения солнечных лучей от поверхности стекла;  $n_2 = 0,8$  — коэффициент, учитывающий уменьшение проникновения лучей из-за загрязнения и пыли поверхности стекла;  $n_3 = 0,8$  — коэффициент, учитывающий уменьшение поверхности окна из-за рам;  $\beta = 0,6-0,8$  — коэффициент воздействия штормов.

Суммарное значение теплопритока  $Q_{T.H.OK}^{AP}$ , Вт, через все окна дома другой ориентации можно снова определить с помощью уравнения теплопередачи [12]:

$$Q_{T.H.OK}^{AP} = \Sigma F_{OK}^{AP} K_{OK} (t_H - t_B), \quad (10)$$

где  $\Sigma F_{OK}^{AP}$  — общая площадь всех оконных проемов другой ориентации, м<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из вышеизложенного метода видно, что охлаждающая нагрузка увеличивается из-за воздействия солнечной радиации. Кроме того, для расчетов охлаждающей нагрузки принимают во внимание только конструкции с южной ориентацией, поскольку воздействие солнечной радиации длится дольше, чем для других сторон здания. Интенсивность солнечной радиации зависит от многих факторов, в табл. 1 приведены данные солнечной радиации на горизонтальные поверхности для разных городов Армении. Из таблицы следует, что максимальное значение солнечной радиации приходится на июль месяц и она влияет на охлаждающую нагрузку здания<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Construction Norms RACN II-7.01–2011. Construction Climatology. 2011. 60 p.

На рис. 4 показаны графики изменения прямой и рассеянной солнечной радиации в течение дня для 38, 40, 42° географических широт в июле для горизонтальных конструкций и ограждений с южной ориентацией. Из графиков видно, что солнечная радиация имеет максимальные значения в 10 ч утра и 15 ч дня для вертикальных ограждений с южной ориентацией, а для горизонтальных — с 12 до 13 ч.

Принимая во внимание значения интенсивности солнечной радиации и условную температуру пограничного слоя на *I-d* диаграмме влажного воздуха (рис. 5), показаны процессы изменения состояния наружного воздуха при адиабатическом увлажнении [16–19]. Температуру наружного воздуха принимаем постоянной 35 °С, а относительную влажность 20, 30, 50 %, температура пограничного слоя достигает 49 °С. По предложенному методу температура пограничного слоя достигает соответственно 33, 36, 41 °С. Данные разные значения за-

висят от климата, и из рис. 5 видно, что при сухих климатических условиях значения разности температур пограничного слоя больше, чем при влажных параметрах наружного воздуха.

Следовательно, температура мокрого термометра зависит от многих факторов, таких как барометрическое давление, температура наружного воздуха и относительная влажность. В табл. 2 приведены вышеизложенные параметры для разных городов Армении. Анализ таблицы обосновывает, что новый метод увлажнения наружного воздуха помогает сократить теплопотупления в здания, так как разность температур пограничного слоя с увлажнением и без увлажнения составляет от 5 до 12 °С.

На рис. 6 приведена графическая зависимость температуры мокрого термометра от относительной влажности при разных значениях температур наружного воздуха. Из графика видно, что чем выше значения относительной влажности, тем выше тем-

Табл. 1. Интенсивность прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальных поверхностях, МДж/м<sup>2</sup>  
Table 1. Intensity of direct and diffuse solar radiation on horizontal surfaces, MJ/m<sup>2</sup>

Город City name	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December	За год In a year
Гюмри Gyumri	334	414	655	774	976	954	1008	889	673	551	352	304	7884
Ереван Yerevan	325	391	637	799	963	955	965	858	673	532	349	293	7740
Мартуни Martuni	374	454	713	832	1030	968	1008	925	702	583	385	342	8316
Севан Sevan	356	453	700	818	987	978	955	917	695	547	375	311	8092
Ташир Tashir	347	418	670	785	986	968	990	882	691	547	359	313	7956

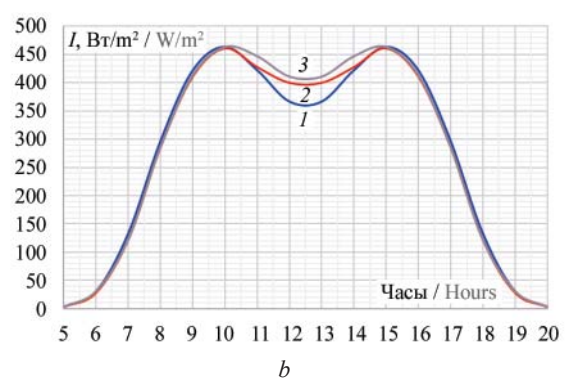
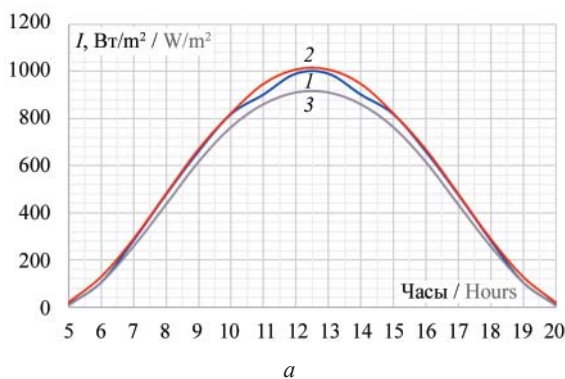
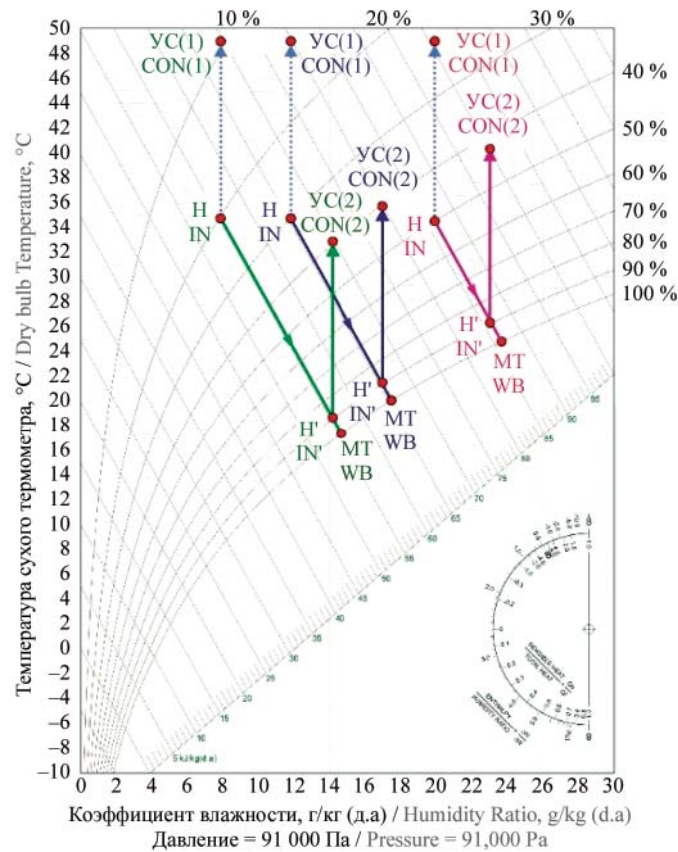


Рис. 4. График изменения прямой и рассеянной солнечной радиации в течение дня для разных географических широт в июле: 1 — 38° северной широты; 2 — 40° северной широты; 3 — 42° северной широты; а — горизонтальные конструкции; б — ограждение конструкции с южной ориентацией

Fig. 4. Graph of changes in direct and diffuse solar radiation during the day for different geographic latitudes in July: 1 — 38° north latitude; 2 — 40° north latitude; 3 — 42° north latitude; a — horizontal constructions; b — enclosing construction with south orientation



**Рис. 5.** Значения условной температуры с увлажнением и без увлажнения при разных параметрах наружного воздуха: Н — параметры наружного воздуха; Н' — параметры воздуха после адиабатического увлажнения; УС(1)/УС(2) — параметры воздуха, учитывая солнечную радиацию (с увлажнением/без увлажнения)

**Fig. 5.** The values of conditional temperature with humidification and without humidification for different parameters of outdoor air: IN — outdoor air parameters; IN' — air parameters after adiabatic humidification; CON(1)/CON(2) — air parameters considering solar radiation (with humidification/without humidification)

**Табл. 2.** Значения температуры мокрого термометра при разных барометрических давлениях<sup>1</sup>

**Table 2.** Temperature values of a wet bulb thermometer at different barometric pressures<sup>1</sup>

Город City name	Барометрическое давление, Па Barometric pressure, Pa	Расчетная температура наружного воздуха, °С Design outside air temperature, °C	Относительная влажность, % Relative humidity, %	Температура мокрого термометра, °С Wet bulb temperature, °C	Температура пограничного слоя Boundary layer temperature	
					с увлажнением with humidification	без увлажнения without humidification
Ереван Yerevan	91 000	34,8	34	21,9	37,9	48,8
Гюмри Gyumri	84 600	30	39	19,3	35,3	44
Иджеван Ijevan	93 600	29,8	52	22,0	38	43,8
Севан / Sevan	80 500	26	50	18,2	34,2	40
Арташат Artashat	92 100	34,9	35	22,3	38,3	48,9
Ехегнадзор Yeghegnadzor	87 500	34,8	28	20,2	36,2	48,8
Одзун / Odzun	89 300	35,5	55	27,3	43,3	49,5

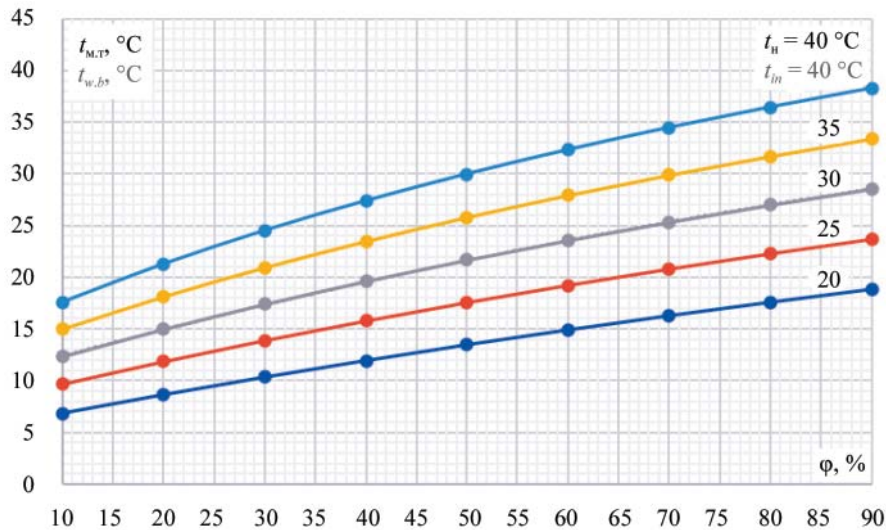


Рис. 6. График зависимости температуры мокрого термометра от относительной влажности и сухого термометра для г. Еревана (91 000 Па)

Fig. 6. The graph of the dependence of the temperature of the wet bulb thermometer on the relative humidity and the dry thermometer, for the city of Yerevan (91,000 Pa)

пература мокрого термометра, так как воздух насыщен водяными парами. Кроме того, чем ниже температура мокрого термометра, тем эффективность предложенного метода увеличивается, так как теплообмен между воздухом и водой происходит интенсивно. Температурная разница между минимальным и максимальным значением мокрого термометра при наружной температуре воздуха  $20^\circ\text{C}$  составляет  $12^\circ\text{C}$ , а при  $40^\circ\text{C}$  —  $21^\circ\text{C}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоснования данной методики были проведены расчеты с увлажнением и без увлажнения для двухэтажного дома. Теплотехнические характеристики конструкций: стена —  $0,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ , пол —  $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ , потолок —  $0,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ , дверь —  $4,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ , окно —  $2,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ ; расчетная температура наружного воздуха —  $35^\circ\text{C}$  (г. Ереван). Суммарная площадь стен —  $197 \text{ м}^2$ ,

окон —  $55 \text{ м}^2$ , дверей —  $8 \text{ м}^2$ , пола и потолка —  $83,7 \text{ м}^2$ , общий объем здания —  $502 \text{ м}^3$ . Сравнительный анализ показал, что предложенный метод испарительного охлаждения снижает охлаждающую нагрузку зданий на  $20\%$ .

Представленный метод увлажнения наружного воздуха помогает сократить теплотеплоупления в здания, так как разность температур пограничного слоя с увлажнением и без увлажнения составляет от  $5$  до  $12^\circ\text{C}$  в зависимости от атмосферного давления и параметров наружного воздуха.

Данный метод испарительного охлаждения целесообразно применять в регионах с сухими климатическими условиями, поскольку температура мокрого термометра ниже, чем при влажных условиях.

Увлажнительное охлаждение снижает охлаждающую нагрузку зданий на  $20\%$ , что способствует не только снижению потребляемых энергоресурсов, но и выбросам в атмосферу.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусева Я.Э., Королёва Н.А. Энергоэффективность в системах кондиционирования воздуха с применением испарительного охлаждения // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2018. № 8 (200). С. 74–77. EDN WAJYBL.
2. Hughes B.R., Calautit J.K., Ghani S.A. The development of commercial wind towers for natural ventilation : a review // Applied Energy. 2012. Vol. 92. Pp. 606–627. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.11.066
3. Amer O., Boukhanouf R., Ibrahim H.G. A review of evaporative cooling technologies // International Journal of Environmental Science and Development. 2015. Vol. 6. Issue 2. Pp. 111–117. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.571
4. Egnatossyan S., Egnatossyan N. Design methodology for irrigation chambers of air conditioning systems. evaporative cooling in the system of air conditioning. LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2021. 52 p.

5. *Ананьев В.А., Балуева Л.Н., Мурашко В.П.* Системы вентиляции и кондиционирования: теория и практика. М. : Евроклимат, 2008. 503 с.
6. *Вишневский Е.П.* Кондиционирование воздуха — увлажнение. Аргументация необходимости увлажнения воздуха и оценка дефицита влаги // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2003. № 10. С. 48–51.
7. *Хомутский Ю.Н.* Расчет косвенно-испарительной системы охлаждения // Мир климата. 2012. № 71. С. 174–182.
8. *Тарабанов М.Г.* Косвенное испарительное охлаждение приточного наружного воздуха в СКВ с доводчиками // АВОК. 2009. № 3. С. 20–32.
9. *Дорошенко А.В.* Испарительные охладители комбинированного типа для систем кондиционирования воздуха // АВОК. 2005. № 6. С. 58–63.
10. *Вишневский Е.П.* Компания CAREL — поставщик оборудования для систем увлажнения воздуха // АВОК. 1998. № 4. С. 40–41.
11. *Стефанов Е.В.* Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб. : Авок Северо-Запад, 2005. 399 с. EDN QNMFFX.
12. *Melikyán Z.A.* Heating-cooling of buildings. Efficiency of conventional and renewable technologies. LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2012. 344 p.
13. *Короткова Т.Г., Ждамарова И.А.* К вопросу расчета температуры мокрого термометра при сушке барды // Научные труды КубГТУ. 2015. № 9. С. 112–122. EDN UNDVVL.
14. *Abada D., Maalouf C., Moussa T., Boudjabi A.F., Polidori G., Rouag-Saffidine D. et al.* Design of a dew point evaporative cooler for buildings in Mediterranean climate // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 111. P. 02021. DOI: 10.1051/e3s-conf/201911102021
15. *Egnatosyan S., Egnatosyan N.* Developing a new method of calculating heat and humidity air treatment by water in irrigation chamber // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281. P. 06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202128106003
16. *Taler J., Jagiela B., Jaremkiwicz M.* Improving efficiency and lowering operating costs of evaporative cooling // MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 338. P. 01027. DOI: 10.1051/mateconf/202133801027
17. *Хомутский Ю.Н.* Применение адиабатного увлажнения для охлаждения воздуха // Мир климата. 2012. № 73. С. 104–112.
18. *Hviid C.A., Zukowska-Tejse D., Nielsen V.* Cooling of schools — results from a demonstration project using adiabatic evaporative cooling with harvested rainwater // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202017202003
19. *Krajčik M., Masaryk M., Šimko M., Mlynár P.* Possibilities of combining radiant wall cooling with ejector cooling cycle powered by Fresnel solar collectors // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/202017203003

Поступила в редакцию 1 августа 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Сирануш Мельсиковна Эгнатосян** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный университет архитектуры и строительства Армении (НУАСА);** Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, д. 105; siranushegnatosyan@gmail.com;

**Наира Мельсиковна Эгнатосян** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный университет архитектуры и строительства Армении (НУАСА);** Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, д. 105; **Институт геологических наук Национальной академии наук Армении (ИГН НАН РА);** Республика Армения, 0019, г. Ереван, ул. Баграмяна, д. 24; egnatosyan@yahoo.com;

**Лусине Артуровна Ерицян** — магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный университет архитектуры и строительства Армении (НУАСА);** Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, д. 105; lusi.yeritsyan@mail.ru.

*Вклад авторов:*

*Эгнатосян С.М. — идея, написание статьи, научное редактирование текста, доработка текста, итоговые выводы.*

*Эгнатосян Н.М. — идея, написание статьи, обработка материала, построение и оформление графиков.*

*Ерицян Л.А. — идея, сбор материала, оформление рисунков, написание статьи.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Guseva Ya.E., Koroleva N.A. Energy efficiency in air conditioning systems with evaporative cooling. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2018; 8(200): 74-77. EDN WAJYBL. (rus.).

2. Hughes B.R., Calautit J.K., Ghani S.A. The development of commercial wind towers for natural ventilation : a review. *Applied Energy*. 2012; 92:606-627. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.11.066
3. Amer O., Boukhanouf R., Ibrahim H.G. A review of evaporative cooling technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2015; 6(2):111-117. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.571
4. Egnatosyan S., Egnatosyan N. *Design Methodology for Irrigation Chambers of Air Conditioning Systems. Evaporative Cooling in the System of Air Conditioning*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2021; 52.
5. Anan'ev V.A., Balueva L.N., Murashko V.P. *Systems of ventilation and conditioning: theory and practice*. Moscow, Evroklimat Publ., 2008; 503. (rus.).
6. Vishnevskiy E.P. Air conditioning — humidification. Argumentation of the need for humidification of air and assessment of moisture deficiency. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2003; 10:48-51. (rus.).
7. Khomutskiy Yu.N. Calculation of indirect-evaporative cooling system. *World Climate*. 2012; 71:174-182. (rus.).
8. Tarabanov M.G. Indirect evaporative cooling of incoming outdoor air in ACS with air conditioners. *AVOK*. 2009; 3:20-32. (rus.).
9. Doroshenko A.V. Evaporative coolers of the combined type for air conditioning systems. *AVOK*. 2005; 6:58-63. (rus.).
10. Vishnevskiy E.P. Company CAREL — supplier of equipment for air humidification systems. *AVOK*. 1998; 4:40-41. (rus.).
11. Stefanov E.V. *Entilation and air conditioning. Engineering systems of buildings*. St. Petersburg, Avok North-West, 2005; 399. EDN QNMFFX. (rus.).
12. Melikyan Z.A. *Heating–Cooling of Buildings. Efficiency of Conventional and Renewable Technologies*. LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2012; 344.
13. Korotkova T.G., Zhdamarova I.A. The question of calculation of wet bulb temperatures on drying grains. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2015; 9:112-122. EDN UNDVVL. (rus.).
14. Abada D., Maalouf C., Moussa T., Boudjabi A.F., Polidori G., Rouag-Saffidine D. et al. Design of a dew point evaporative cooler for buildings in Mediterranean climate. *E3S Web of Conferences*. 2019; 111:02021. DOI: 10.1051/e3sconf/201911102021
15. Egnatosyan S., Egnatosyan N. Developing a new method of calculating heat and humidity air treatment by water in irrigation chamber. *E3S Web of Conferences*. 2021; 281:06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202128106003
16. Taler J., Jagieła B., Jaremkiwicz M. Improving efficiency and lowering operating costs of evaporative cooling. *MATEC Web of Conferences*. 2021; 338:01027. DOI: 10.1051/mateconf/202133801027
17. Khomutskiy Yu.N. Application of adiabatic humidification for air cooling. *World Climate*. 2012; 73:104-112. (rus.).
18. Hviid C.A., Zukowska-Tejse D., Nielsen V. Cooling of schools — results from a demonstration project using adiabatic evaporative cooling with harvested rainwater. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202017202003
19. Krajčik M., Masaryk M., Šimko M., Mlynár P. Possibilities of combining radiant wall cooling with ejector cooling cycle powered by Fresnel solar collectors. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:03003. DOI: 10.1051/e3sconf/202017203003

Received August 1, 2022.

Adopted in revised form on May 15, 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

**BIONOTES:** **Siranush M. Egnatosyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **National University of Architecture and Construction of Armenia (NUACA)**; 105 Teryana st., Yerevan, 0009, Republic of Armenia; siranushegnatosyan@gmail;

**Naira M. Egnatosyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **National University of Architecture and Construction of Armenia (NUACA)**; 105 Teryana st., Yerevan, 0009, Republic of Armenia; **Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (IGS NAS RA)**; 24 Bagramyana st., Yerevan, 0019, Republic of Armenia; egnatosyan@yahoo.com;

**Lusine A. Yeritsyan** — master's student, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **National University of Architecture and Construction of Armenia (NUACA)**; 105 Teryana st., Yerevan, 0009, Republic of Armenia; lusi.yeritsyan@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Siranush M. Egnatosyan — idea, article writing, scientific text editing, text refinement, final conclusions.*

*Naira M. Egnatosyan — idea, article writing, material processing, construction of graphics.*

*Lusine A. Yeritsyan — idea, collection of material, design of drawings, writing of articles.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.697:697.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1123-1137

## Эффективность применения солнечных панелей в условиях Ленинградской области

Михаил Алексеевич Карташов, Екатерина Ивановна Иванова,  
Ксения Игоревна Стрелец, Антон Евгеньевич Радаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Комфорт в частных домах до сих пор остается неизменной причиной, по которой все больше людей предпочитают постоянное проживание вдали от города. Энергообеспечение и экономия становятся ключевыми проблемами, из-за которых граждане чаще обращаются к альтернативным источникам энергии. Один из них — использование солнечных панелей и установок для частного малоэтажного строительства. Рассмотрена эффективность применения такого метода энергообеспечения дома, приведен расчет стоимости установки и ее окупаемости при расположении объекта в Ленинградской области.

**Материалы и методы.** Использованы методы измерения на объекте и математические методы оценки.

**Результаты.** Автономное энергообеспечение дома возможно только в период с марта по сентябрь; в январе, феврале, октябре, ноябре и декабре придется прибегнуть к дополнительному оборудованию для энергообеспечения, в качестве которого в исследовании выбран генератор.

**Выводы.** Выявили, что установка системы автономного обеспечения объекта малоэтажного строительства электроэнергией на солнечных элементах имеет очень большой срок окупаемости при расположении в Ленинградской области, при этом экономическая оценка показывает, что средства, потраченные на установку, целесообразно вложить на долгосрочный период, нежели платить за электроэнергию каждый месяц. Подобное решение может быть эффективно в условиях безальтернативности источников энергии или нахождения в удалении от общей линии электропередач, так как затраты на прокладку энергосети будут аналогичными данной установке без учета затрат на оплату электричества по тарифу.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** солнечные панели, солнечная установка, эффективность, малоэтажный дом, окупаемость, Ленинградская область

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Карташов М.А., Иванова Е.И., Стрелец К.И., Радаев А.Е. Эффективность применения солнечных панелей в условиях Ленинградской области // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1123–1137. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1123-1137

Автор, ответственный за переписку: Михаил Алексеевич Карташов, kartashov.ma@edu.spbstu.ru.

## Efficiency of solar panels application in conditions of Leningrad region

Mikhail A. Kartashov, Ekaterina I. Ivanova, Kseniya I. Strelets, Anton E. Radaev  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Comfort in private homes remains a constant reason why more and more people prefer permanent residence in the suburbs. Energy supply and savings are becoming one of the most important reasons for turning to alternative energy sources. One of these is the use of solar panels and installations. In this paper, the efficiency of using such a method of energy supply at home is considered, the calculation of the cost and payback in the Leningrad region is given.

**Materials and methods.** The methods of measurements on the object and mathematical methods of estimation were used.

**Results.** Autonomous power supply of the house is possible only in the period from March to September, in January, February, October, November and December it is necessary to resort to using additional equipment as a generator.

**Conclusions.** According to the results of the study, the installation of an autonomous system for providing a low-rise construction facility with electricity on solar cells has a very long payback period when located in the Leningrad region, while an economic assessment shows that it is advisable to add up the funds spent on the installation for a long-term period rather than paying for electricity every month. Such a solution can be effective in conditions where there is no alternative to energy sources or being at a distance from a common power line, since the costs of laying the power grid will be similar to this installation without taking into account the cost of paying for electricity according to the tariff.

**KEYWORDS:** solar panel, solar station, efficiency, low-rise building, payback, Leningrad region

**FOR CITATION:** Kartashov M.A., Ivanova E.I., Strelets K.I., Radaev A.E. Efficiency of solar panels application in conditions of Leningrad region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1123-1137. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1123-1137 (rus.).

Corresponding author: Mikhail A. Kartashov, kartashov.ma@edu.spbstu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Комфорт в частных домах остается неизменной причиной, по которой все больше людей предпочитают постоянное проживание в пригороде. Только за последний год процент проживающих в индивидуальных малоэтажных домах увеличился в несколько раз. Участки индивидуальной застройки не всегда располагаются в зонах снабжения электричеством и газом, для их обеспечения требуется надежный и бесперебойный источник питания, который бы не зависел от внешних ресурсов<sup>1, 2</sup> [1–4]. Этим обусловлен растущий спрос на использование возобновляемых источников энергии как для обеспечения энергией объекта, так и для возможности снижения затрат на электроэнергию<sup>3</sup> [5, 6].

Возобновляемые источники энергии могут конкурировать с традиционными энергетическими технологиями, поскольку являются экономически выгодными [5, 7–10]. Их применение не наносит вреда окружающей среде, они экологичны, отсутствует необходимость в транспортировке и топливных затратах [11–13].

Использование солнечных панелей (СП) — один из способов получения энергии в малоэтажном частном строительстве, позволяющий не только быть независимым от внешней энергосети, но и сократить затраты на отопление, если СП применяются в паре с внешним подключением [14–18].

<sup>1</sup> Карта газификации Санкт-Петербурга и Ленинградской области. URL: <https://gazprommap.ru/lenobl/>

<sup>2</sup> Карта газификации в Санкт-Петербурге на 2021–2025 годы. URL: <https://gogov.ru/gazprommap/spb>

<sup>3</sup> Марченко О.В., Соломин С.В. Повышение эффективности энергоснабжения децентрализованных потребителей с применением возобновляемых источников энергии и топливных элементов // Экология промышленного производства. 2008. № 1. С. 86–90.

Задача исследования заключается в оценке целесообразности установки СП для автономного обеспечения жилого объекта электроэнергией и отоплением. Используются данные разделов солнечной геометрии, количество инсоляции объекта, правильного расположения солнечной установки (СУ) для получения максимально возможной выработки энергии в условиях климата г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области<sup>4</sup> [19, 20].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования выбран участок жилой малоэтажной застройки, находящийся в пос. Дятлицы на юго-западе г. Санкт-Петербург (59.686166, 29.636634) Ленинградской области. Климат — умеренный и влажный. Продолжительность дня 22 декабря — 5 ч 59 мин, 22 июня — 18 ч 46 мин. Дом расположен в низине, поэтому характерна смена потока воздушных масс<sup>5</sup>.

Для расчета и рассмотрения возможности автономного содержания объекта с использованием СУ взят жилой дом с площадью жилых помещений 165 м<sup>2</sup>, рассчитанный на постоянное проживание семьи из трех человек, подключенный к сетевому энергообеспечению. Характеристика дома и график энергопотребления показаны в табл. 1 и на рис. 1.

Для расчета СУ следует измерить энергопотребителей данного дома, замеры представлены в табл. 2.

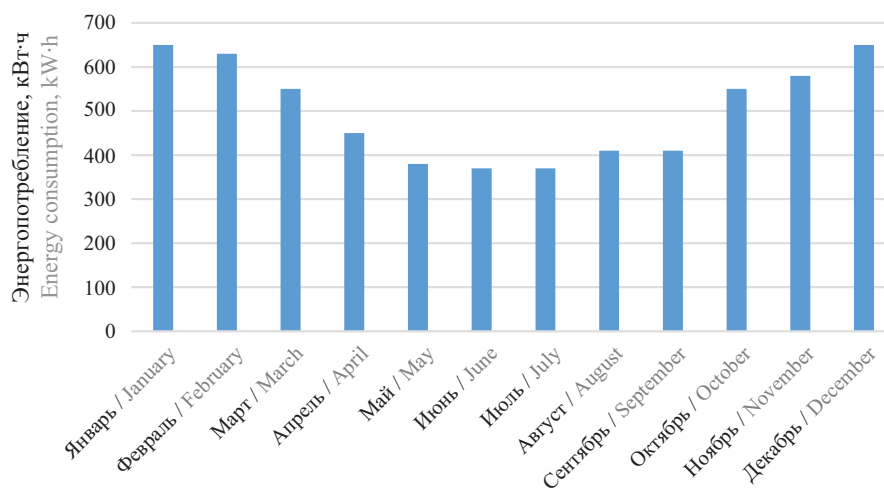
<sup>4</sup> Сурков М.А., Обухов С.Г., Плотников И.А., Сумарокова Л.П., Попов М.М., Байдали С.А. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf>

<sup>5</sup> Восход и закат солнца в Дятлицах. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/dyatlitsy/sunrise/>

Табл. 1. Характеристика рассматриваемой постройки

Table 1. Characteristics of the building

Год постройки / Year of construction	2017
Материал стен / Wall material	Керамический кирпич, газобетонные блоки, утеплитель (минеральная вата), декоративный кирпич Ceramic brick, aerated concrete blocks, insulation (mineral wool), decorative brick
Площадь жилых помещений / Living area	165 м <sup>2</sup> / m <sup>2</sup>
Количество комнат / Number of rooms	6
Этажность / Number of floors	2
Количество проживающих Number of residents	3
Холодное водоснабжение / Cold water supply	Индивидуальное (скважина) / Individual (well)
Отопление и горячее водоснабжение Heating and hot water supply	Двухконтурный газовый котел Double-circuit gas boiler
Электропотребление (среднее за год) Power consumption (average for the year)	6500 кВт·ч / kW·h



**Рис. 1.** График энергопотребления дома

**Fig. 1.** Home energy consumption graph

**Табл. 2.** Потребляемая мощность электроприборов, установленных в доме

**Table 2.** Power consumption of electrical appliances installed in the house

Наименование приборов Name of devices	Количество, шт. Number, pcs	Мощность приборов, Вт Power of devices, W	Потребляемая мощность в сутки, кВт·ч/сут Power consumption per day, kW·h/day
Энергосберегающая лампа Energy saving lamp	50	11	1,65
Телевизор / TV	4	300	1,20
Компьютер Computer	1	350	1,05
Холодильник Fridge	1	500	3,00
Чайник / Teapot	1	2500	1,25
Стиральная машина Washing machine	1	2000	0,86
Утюг / Iron	1	1500	0,43
Пылесос Vacuum cleaner	1	1600	0,23
Посудомоечная машина Dishwasher	1	2000	0,86
Циркуляция воды Water circulation	1	50	1,20
Внешнее освещение Outdoor lightning	10	40	1,20
Электроплита Electric stove	1	1500	3,00
Микроволновка Microwave	1	1500	0,30
Газовый котел Gas boiler	1	200	1,20
			Итого: 17,42 кВт·ч/сут Total: 17.42 kW·h/day

Табл. 3. Месячные и годовые показатели солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Санкт-Петербурге  
Table 3. Monthly and annual indicators of solar radiation on horizontal surface in St. Petersburg

Показатели солнечной радиации Indicators of solar radiation	Месяц Month												Год Year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
кВт·ч/м <sup>2</sup> / kW·h/m <sup>2</sup>	16,4	34,6	79,4	111,2	161,4	166,7	166,3	130,1	82,9	41,4	18,6	11,7	1020,7
МДж/м <sup>2</sup> / MJ/m <sup>2</sup>	58	130	270	388	563	615	568	462	288	134	56	31	3563

Корректировка расчетов производилась при помощи калькулятора СП<sup>6</sup>.

Согласно СП 31-110–2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий»<sup>7</sup>:

$$P_p = P_n K_c, \quad (1)$$

где  $P_p$  — искомое расчетное значение мощности;  $P_n$  — номинальное суммарное значение мощности электроприборов;  $K_c = 0,8$  — коэффициент спроса, учитывающий неодновременность работы электропотребителей.

$$P_p = 17,42 \cdot 0,8 = 13,93 \text{ кВт.}$$

Исходя из полученного расчетного значения мощности, выбирается мощность энергокомплекса в зависимости от желаемого процента замещения, но лучше брать исходное число для запаса.

Исходными данными для работы служат широта и долгота пункта в заданном районе, а также номера расчетных дней месяцев:

$$\varphi = 59,68^\circ N, \quad \lambda = 29,63^\circ.$$

Количественная оценка солнечной радиации необходима для проектирования конструкции СУ, включая определение количества солнечных элементов.

Определены среднегодовые показатели суммарной солнечной радиации для г. Санкт-Петербурга, Ленинградской области (табл. 3).

Имея данные по потреблению дома и параметры солнечной инсоляции региона, была запроектирована электростанция на солнечных панелях.

Выполним расчет количества энергии, которую будет вырабатывать выбранная СП за каждый месяц, на основании информации о суммарной солнечной радиации в регионе и технических характеристик панели по следующей формуле:

$$W_m = S_m E k \eta, \quad (2)$$

где  $W_m$  — количество вырабатываемой энергии солнечной панелью, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $S_m$  — площадь СП;  $E$  —

<sup>6</sup> Калькулятор солнечных батарей для расчета выработки электрической энергии и окупаемости. URL: <https://e-solarpower.ru/kalkulyator-vyrabotki-sb/>

<sup>7</sup> СП 31-110–2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий.

значение инсоляции за выбранный период, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент, учитывающий поправку на потери мощности солнечных элементов в связи с нагревом и наклонным падением солнечных лучей;  $\eta$  — КПД солнечной панели.

Коэффициент  $k$  принимаем равным 0,5 зимой и 0,7 летом. Значение коэффициента больше зимой в связи с меньшим нагревом поверхности СП. Предварительно определить требуемое количество СП для полного обеспечения электроэнергией здания можно по формуле<sup>8, 9, 10</sup> [21]:

$$N = \frac{W_{п.м}}{W_m}, \quad (3)$$

где  $N$  — количество солнечных панелей;  $W_{п.м}$  — среднее потребление электроэнергии в месяц.

Анализ приведен в табл. 4.

Из табл. 4 минимальное количество панелей, необходимое для полного энергоснабжения дома, в месяц равно 188 штук, причем для панелей мощностью 550 Вт. Представляется рациональным выбрать 50 СП и прибегнуть к подключению общей энергосети или предусмотреть резервную энергостанцию в виде дизельного, бензинового или газового генератора.

Воспользуемся солнечным калькулятором для оптимального расчета по исследуемому участку объекта<sup>11</sup>.

Для расчета возьмем следующие показатели: солнечные панели 550 Вт — 50 шт. и 188 шт. под углом 43°. Полученные результаты представлены на рис. 2, 3.

<sup>8</sup> Курейчик Е.П. Закономерности распределения солнечной радиации по поверхности Земли. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/16448/Курейчик%20Е.П.%20Закономерности%20распределения%20солнечной%20радиации%20по%20поверхности%20Земли.pdf?sequence=1>

<sup>9</sup> Калькулятор расстояния между рядами модулей в зависимости от времени года. URL: <https://pvrowspacingcalculator.com/>

<sup>10</sup> Расстояние между рядами солнечных модулей: 6 шагов расчета. URL: <https://www.solarhome.ru/rasstoyanie-mezhdu-ryadami-solnechnyh-modulej.htm>

<sup>11</sup> Онлайн-калькулятор солнечных батарей. URL: <https://solar-e.ru/solarcalc/>

Табл. 4. Анализ данных для подбора солнечной панели SilaSolar

Table 4. Data analysis for solar panel selection SilaSolar

Мощность, Вт Power, W	Площадь панели $S$ , м <sup>2</sup> Panel area $S$ , m <sup>2</sup>	Месяц Month	Значение инсоляции $E$ Insolation Value $E$	Коэффициент поправки $k$ Correction coefficient $k$	КПД $\eta$ , % Efficiency $\eta$ , %	Угол наклона, градус Angle of inclination, degree	Количество $N$ Number $N$	Выработка энергии $W_{пр}$ , кВт·ч Produced energy $W_{пр}$ , kW·h	Потребление энергии $W_{потр.мес.}$ , кВт·ч/мес Consumed energy $W_{cons.month}$ , kW·h/month	Минимальное значение, шт. Min value, pcs
550	2,58	Январь / January	16,4	0,5	24	43	106	5,08	540,33	188
		Февраль / February	34,6	0,5	24	43	46	10,71	488,04	
		Март / March	79,4	0,7	24	43	16	34,42	540,33	
		Апрель / April	111,2	0,7	24	43	11	48,20	522,9	
		Май / May	161,4	0,7	24	43	8	69,96	540,33	
		Июнь / June	166,7	0,7	24	43	7	72,25	522,9	
		Июль / July	166,3	0,7	24	43	7	72,08	540,33	
		Август / August	130,1	0,7	24%	43	10	56,39	540,33	
		Сентябрь / September	82,9	0,7	24%	43	15	35,93	522,9	
		Октябрь / October	41,4	0,5	24	43	42	12,82	540,33	
		Ноябрь / November	18,6	0,5	24	43	91	5,76	522,9	
Декабрь / December	11,7	0,5	19	43	188	2,87	540,33			
280	1,63	Январь / January	16,4	0,5	19	43	213	2,54	540,33	298
		Февраль / February	34,6	0,5	19	43	91	5,36	488,04	
		Март / March	79,4	0,7	19	43	31	17,21	540,33	
		Апрель / April	111,2	0,7	19	43	22	24,11	522,9	
		Май / May	161,4	0,7	19	43	15	34,99	540,33	
		Июнь / June	166,7	0,7	19	43	14	36,14	522,9	
		Июль / July	166,3	0,7	19	43	15	36,05	540,33	
		Август / August	130,1	0,7	19	43	19	28,20	540,33	
		Сентябрь / September	82,9	0,7	19	43	29	17,97	522,9	
		Октябрь / October	41,4	0,5	19	43	84	6,41	540,33	
		Ноябрь / November	18,6	0,5	19	43	182	2,88	522,9	
Декабрь / December	11,7	0,5	19	43	298	1,81	540,33			
200	1,32	Январь / January	16,4	0,5	17	43	294	1,84	540,33	412
		Февраль / February	34,6	0,5	17	43	126	3,88	488,04	
		Март / March	79,4	0,7	17	43	43	12,47	540,33	
		Апрель / April	111,2	0,7	17	43	30	17,47	522,9	
		Май / May	161,4	0,7	17	43	21	25,35	540,33	
		Июнь / June	166,7	0,7	17	43	20	26,19	522,9	
		Июль / July	166,3	0,7	17	43	21	26,12	540,33	
		Август / August	130,1	0,7	17	43	26	20,44	540,33	
		Сентябрь / September	82,9	0,7	17	43	40	13,02	522,9	
		Октябрь / October	41,4	0,5	17	43	116	4,65	540,33	
		Ноябрь / November	18,6	0,5	17	43	251	2,09	522,9	
Декабрь / December	11,7	0,5	17	43	412	1,31	540,33			

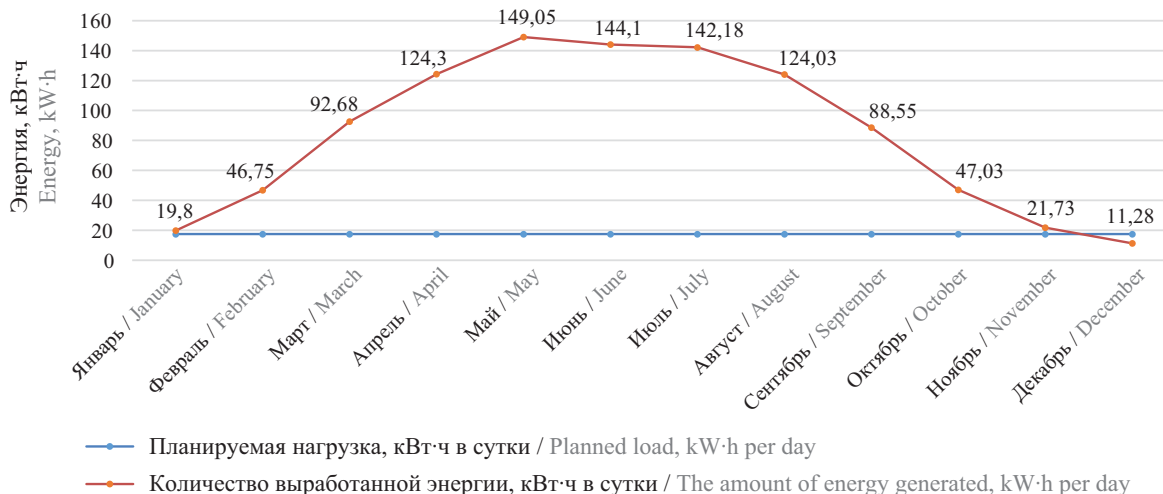


Рис. 2. График выработки солнечной энергии 50 панелями

Fig. 2. Graph of solar energy generation by 50 panels

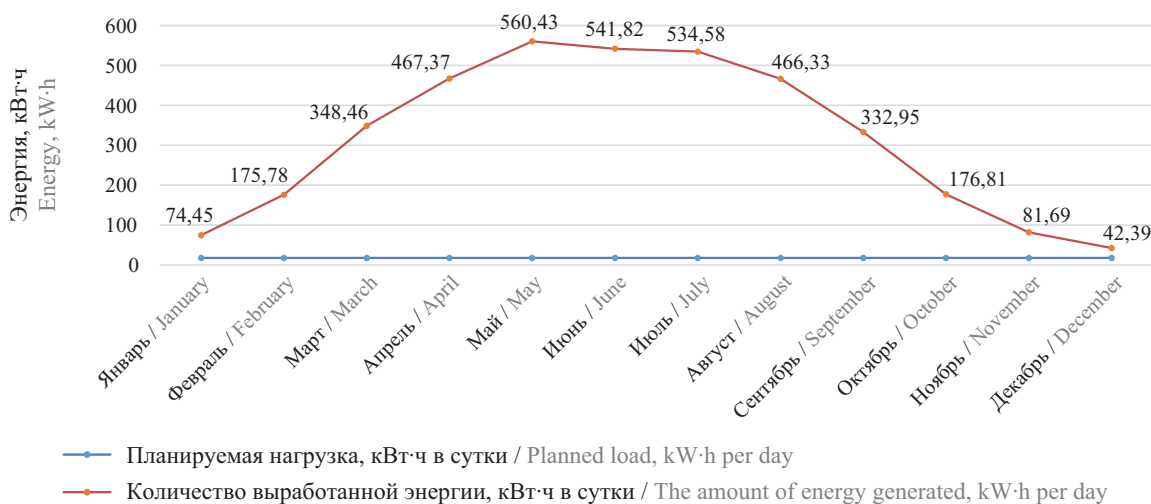


Рис. 3. График выработки солнечной энергии 188 панелями

Fig. 3. Graph of solar energy generation by 188 panels

Принимать количество СП, равное 50 шт., нецелесообразно, так как выработка электроэнергии летом будет намного больше, чем потребление, следовательно, она будет уходить в никуда, хоть и покроет практически все месяцы использования, кроме декабря, а стоимость составит 1 021 900 руб., поэтому произведем более экономически выгодный расчет и примем количество панелей 20 шт. при стоимости 408 760 руб., расчет представлен на рис. 4.

Из графика (см. рис. 4) видно, что СУ не может полностью обеспечить дом электроэнергией в январе, феврале, октябре, ноябре и декабре. Поэтому принято решение об установке аккумуляторных батарей (АБ) для накопления электроэнергии, выбран AGM аккумулятор SunStonePower ML12-200 (200 А·ч)<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Тяговый AGM аккумулятор. URL: <https://e-solarpower.ru/batteries/agm-bat/akkumulyator-agm-sunstonepower-ml200/>

Солнечный контроллер заряда, представленный на рис. 5, является неотъемлемой частью солнечной электростанции, без него невозможна правильная работа всего оборудования в комплексе, например контроль правильности заряда АБ.

Контроллер выбираем по току заряда, панели соединены последовательно, используем формулу для определения тока заряда:

$$I_{зар} = \frac{P_{сп}}{U_{сп}}, \tag{4}$$

где  $I_{зар}$  — ток заряда, А;  $P_{сп}$  — мощность солнечной панели, Вт;  $U_{сп}$  — оптимальное рабочее напряжение, В.

$$I_{зар} = \frac{550}{41,95} = 13,11 \text{ А.}$$

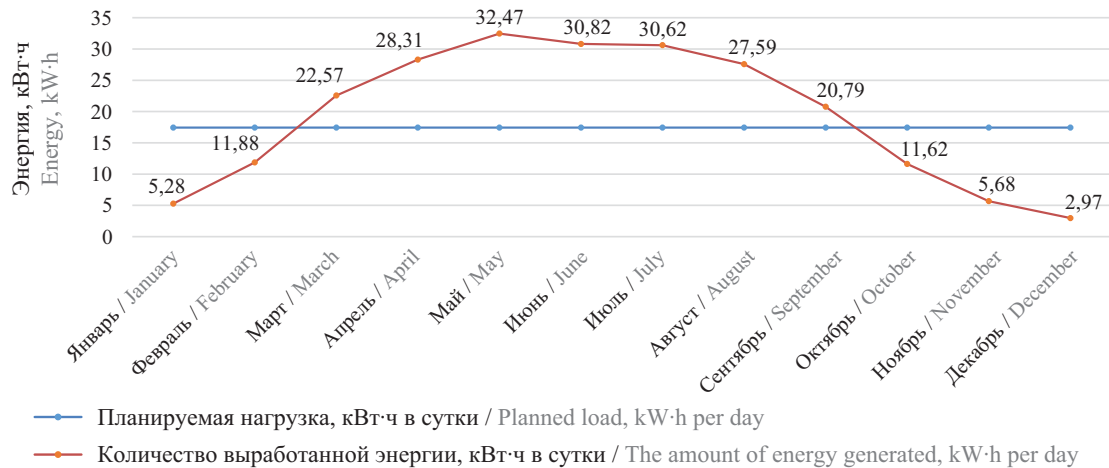


Рис. 4. График выработки солнечной энергии 20 панелями  
 Fig. 4. Graph of solar energy generation by 20 panels

Выбираем контроллер Tracer-2210RN/2215RN. Максимально входное напряжение данного контроллера 260 или 520 В, от этого зависит, сколько панелей можно подключить одновременно. Выберем 520 В, тогда число панелей равно 20, потребуется 4 контроллера. Стоимость одного составит 9140 руб., следовательно 36 560 руб.<sup>13</sup>

Выбор инвертора основан на данных о максимальной потребляемой мощности, входном напряжении и его форме. Выше значение инвертора на входе напряжения — меньше потери. Из типов 12, 24 и 48 В выбираем последний.

Предположим пиковую нагрузку в системе при работе всех приборов в течение 30 мин, получим значение 3,5 кВт. Выбираем инвертор с запасом SOFAR 5KTLM-G2 (рис. 6)<sup>14</sup>.

Потребление в сутки составляет 17,43 кВт·ч, аккумулятор на 200 А·ч запасает:

$$200 \text{ A} \cdot 12 \text{ В} = 2400 \text{ Вт.}$$

Стоит учесть, что аккумуляторы до полной разрядки доводить нельзя, поэтому процент разряда составит 70 %:

$$200 \text{ A} \cdot 12 \text{ В} \cdot 0,7 = 1680 \text{ Вт.}$$

Пиковая кратковременная нагрузка по всем приборам составит 5 кВт, тогда потребуется три таких АБ. Стоимость — 29 465 руб., а трех — 88 395 руб.

Из графика выработки солнечной энергии 20 панелями на рис. 4 видно, что в зимний период станция неспособна обеспечить дом энергией, поэтому был выбран генератор и посчитана недостающая мощность (табл. 5).

<sup>13</sup> Контроллер заряда. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/chg-ctrl/mppt-ctrl/kontroller-zaryada-epsolar-tracer-mppt-2215rn-20a-12v-24v/>

<sup>14</sup> Сетевой солнечный инвертор SOFAR 5KTLM-G2. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/inverter/ongrid-inv/setevoy-solnechnyy-invertor-sofar-5ktlm-g2/>



Рис. 5. Солнечный контроллер заряда с отслеживанием точки максимальной мощности

Fig. 5. Solar charge controller with maximum power point tracking



Рис. 6. Сетевой солнечный инвертор SOFAR 5KTLM-G2  
 Fig. 6. SOFAR 5KTLM-G2 Network Solar Inverter

Табл. 5. Недостающая мощность по месяцам

Table 5. Missing capacity by month

Месяц Month	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
$P_{п.}$ , кВт/сут $P_{cons}$ , kWh/day	17,43	17,43	–	–	–	–	–	–	–	17,43	17,43	17,43
$P_{выр}$ , кВт/сут $P_{gen}$ , kWh/day	5,28	11,88	–	–	–	–	–	–	–	11,62	5,68	2,97
$P_{нед}$ , кВт/сут $P_{mis}$ , kWh/day	12,15	5,55	–	–	–	–	–	–	–	5,81	11,75	14,46
$P_{нед}$ , кВт/мес $P_{mis}$ , kWh/month	376,65	155,4	–	–	–	–	–	–	–	180,11	352,5	448,26
Итого, кВт/сут Total, kWh/day	49,72											
Итого, кВт/мес Total, kWh/month	1512,92											

Выполним расчет использования генераторной установки мощностью 5 кВт, так как это максимальная пиковая нагрузка.

По данным из табл. 5 можно понять, сколько времени будет работать генератор в сутки при мощности 5 кВт.

Аккумулятор запасает 2400 Вт, таких предусмотрено 3 шт., значит, общая мощность 7200 Вт, емкость 200 А·ч, общая 600 А·ч, ток заряда 60 А, тогда:

$$t = \frac{C}{I}, \quad (5)$$

где  $t$  — время зарядки трех аккумуляторов;  $C$  — емкость аккумуляторов;  $I$  — ток зарядки.

$$t = \frac{600 \text{ А} \cdot \text{ч}}{60 \text{ А}} = 10 \text{ ч.}$$

Если выбирать генератор меньшей мощности, можно потерять пиковую нагрузку при разряженных аккумуляторах, поэтому остановим выбор на следующем генераторе, показанном на рис. 7<sup>15</sup>.



Рис. 7. Бензиновый генератор DDE GG5500P

Fig. 7. Gasoline generator DDE GG 5500P

<sup>15</sup> Бензиновый генератор DDE GG5500P. URL: <https://www.220-volt.ru/catalog-440119/>

Стоимость данного устройства составит 42 780 руб.

На основании подбора СП было подобрано дополнительное оборудование, а именно:

- контроллер заряда, обеспечивающий правильный заряд аккумулятора и исключающий его выход из строя из-за перезарядки;
- инвертор, преобразующий постоянный ток от СУ в переменный для энергоснабжения элементов постройки;
- аккумуляторная установка для запаса избыточной энергии и ее использования, когда происходит недовыработка панелями;
- генераторная установка мощностью 5 кВт, обеспечивающая бесперебойную работу при отсутствии достаточного заряда от СП.

В связи с растущими ценами на электроснабжение от общей сети принято решение произвести расчет сроков окупаемости и рентабельности данных вложений. Для этого проанализирована динамика тарифов на электричество в г. Санкт-Петербурге с 2015 по 2022 гг.

Анализ тарифов на электричество в г. Санкт-Петербурге 2015–2022 гг. представлен в табл. 6<sup>16</sup>.

Получив эти данные, выстроим динамику цен на электроэнергию на 12 лет вперед с помощью линии тренда в программе Excel.

Строим график зависимости на основе табличных сведений, используя линию тренда с прогнозом на 12 лет вперед, и показываем получившееся степенное уравнение. Получим следующий график (рис. 8).

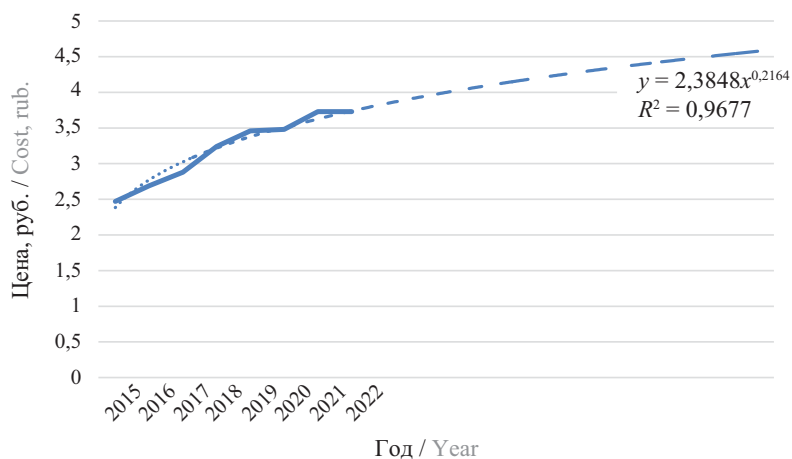
Отклонения от первоначальной цены за 7 лет в средних значениях представлены в табл. 7.

<sup>16</sup> Тарифы на электроэнергию по Санкт-Петербургу. URL: [https://www.pes.spb.ru/for\\_customers/electricity\\_tariffs/elektrosnabzhenie/](https://www.pes.spb.ru/for_customers/electricity_tariffs/elektrosnabzhenie/)

**Табл. 6.** Тарифы на электроэнергию по г. Санкт-Петербургу, установленные Распоряжением Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 26.12.2014 № 614-р, для населения, проживающего в городских населенных пунктах в домах

**Table 6.** Electricity tariffs in St. Petersburg are established by the Order of the St. Petersburg Tariff Committee No. 614-r dated December 26, 2014, for the population living in urban settlements in houses

Размер тарифа, руб./кВт·ч, включая НДС / The size of the tariff, rub./kW·h, including VAT		
Одноставочный тариф One rate tariff	Тариф, дифференцированный по двум зонам суток Double zoned tariff	
	дневная / day zone	ночная / night zone
С 01.01.2015 по 30.06.2015 г. / From January 1, 2015 to June 30, 2015 year		
2,47	2,49	1,50
С 01.01.2016 по 30.06.2016 г. / From January 1, 2016 to June 30, 2016 year		
2,69	2,74	1,61
С 01.01.2017 по 30.06.2017 г. / From January 1, 2017 to June 30, 2017 year		
2,88	3,00	1,73
С 01.01.2018 по 30.06.2018 г. / From January 1, 2018 to June 30, 2018 year		
3,24	3,41	1,97
С 01.01.2019 по 30.06.2019 г. / From January 1, 2019 to June 30, 2019 year		
3,46	3,67	2,13
С 01.01.2020 по 30.06.2020 г. / From January 1, 2020 to June 30, 2020 year		
3,48	3,84	2,22
С 01.01.2021 по 30.06.2021 г. / From January 1, 2021 to June 30, 2021 year		
3,5	3,9	2,36
С 01.01.2022 по 30.06.2022 г. / From January 1, 2022 to June 30, 2022 year		
3,73	4,28	2,36



**Рис. 8.** График динамики цен на электричество по одноставочному тарифу 2015–2022 гг.

**Fig. 8.** Graph of the dynamics of electricity prices at a single-rate tariff 2015–2022 year

**Табл. 7.** Отклонения от первоначальной цены

**Table 7.** Deviations from the original price

Размер тарифа руб./кВт·ч, включая НДС / The size of the tariff is rub/kW·h, including VAT		
Одноставочный тариф One rate tariff	Тариф, дифференцированный по двум зонам суток Double zoned tariff	
	дневная / day zone	ночная / night zone
0,18	0,26	0,12

Если учесть эти средние значения, то можно просчитать примерные цены на электричество в течение семи лет.

По формуле  $y = ax + b$ , где коэффициент  $a$  рассчитывается как  $Y_{cp} - bX_{cp}$  ( $Y_{cp}$  и  $X_{cp}$  — среднее арифметическое чисел из выборок известных значений  $y$  и  $x$  соответственно).

Коэффициент  $b$  определяется по формуле:

$$b = \frac{\sum(x - X_{cp})(y - Y_{cp})}{\sum(x - X_{cp})^2} \quad (6)$$

В табл. 8 приведена стоимость электроэнергии за 2015–2022 гг. Спрогнозировать стоимость на ближайшие 7 лет помогла формула (6).

Рассчитаем среднюю стоимость 1 кВт электроэнергии на основании имеющихся и расчетных сведений. Данные сведены в табл. 9.

Исходя из потребления количества энергии в месяц, рассчитаем, сколько времени потребуется, чтобы окупить данное оборудование:

$$N = 12PW, \quad (7)$$

где  $N$  — искомая цена за год; 12 — число месяцев в году;  $P$  — коэффициент потребляемой энергии на текущий год;  $W$  — количество потребляемой энергии.

$N = 3,73 \cdot 12 = 24\ 170,4$  руб. за год при одноставочном тарифе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведем анализ стоимости выбранного оборудования, чтобы получить суммарные затраты на его приобретение, установку и технические расходы.

Табл. 8. Стоимость электроэнергии на 2015–2029 гг.

Table 8. The cost of electricity for 2015–2029

Год Year	Одноставочный тариф, руб./кВт·ч One rate tariff, rub/kW·h
2015	2,47
2016	2,69
2017	2,88
2018	3,24
2019	3,46
2020	3,48
2021	3,5
2022	3,61
2023	3,919
2024	4,086
2025	4,253
2026	4,421
2027	4,588
2028	4,755
2029	4,922

Табл. 9. Прогнозируемые цены на электроэнергию за 2022–2034 гг.

Table 9. Projected electricity prices for 2022–2034

Размер тарифа руб./кВт·ч, включая НДС / The size of the tariff is rub/kW·h, including VAT		
Одноставочный тариф One rate tariff	Тариф, дифференцированный по двум зонам суток Double zoned tariff	
	дневная / day zone	ночная / night zone
С 01.01.2022 по 30.06.2022 г. / From January 1, 2022 to June 30, 2022 year		
3,73	4,28	2,36
С 01.01.2023 по 30.06.2023 г. / From January 1, 2023 to June 30, 2023 year		
3,91	4,54	2,48
С 01.01.2024 по 30.06.2024 г. / From January 1, 2024 to June 30, 2024 year		
4,09	4,80	2,60
С 01.01.2025 по 30.06.2025 г. / From January 1, 2025 to June 30, 2025 year		
4,27	5,06	2,72
С 01.01.2026 по 30.06.2026 г. / From January 1, 2026 to June 30, 2026 year		
4,45	5,32	2,84
С 01.01.2027 по 30.06.2027 г. / From January 1, 2027 to June 30, 2027 year		
4,63	5,58	2,96
С 01.01.2028 по 30.06.2028 г. / From January 1, 2028 to June 30, 2028 year		
4,81	5,84	3,08
С 01.01.2029 по 30.06.2029 г. / From January 1, 2029 to June 30, 2029 year		
4,99	5,10	3,20

При использовании оборудования по средним ценам:

- солнечная панель SilaSolar 550Вт 10BB (Bifacial) — 20 шт. (408 760 руб.);
- солнечный контроллер заряда Tracer-2210RN/2215RN — 4 шт. (36 560 руб.);
- сетевой солнечный инвертор SOFAR 5KTLM-G2 — 1 шт. (51 000 руб.);
- аккумулятор AGM SunStonePower ML12-200 — 3 шт. (88 395 руб.);
- бензиновый генератор DDE GG5500P — 1 шт. (42 780 руб.).

Стоимость всего оборудования составляет 627 495 руб.

В табл. 10 представлен расчет тарифов электроэнергии на период с 2022 по 2039 гг. при помощи программы Excel.

Получив необходимые данные, отобразим их на рис. 9, чтобы понять динамику роста платежей за электроэнергию.

Зная вложения на СУ, просчитаем срок ее окупаемости (рис. 10).

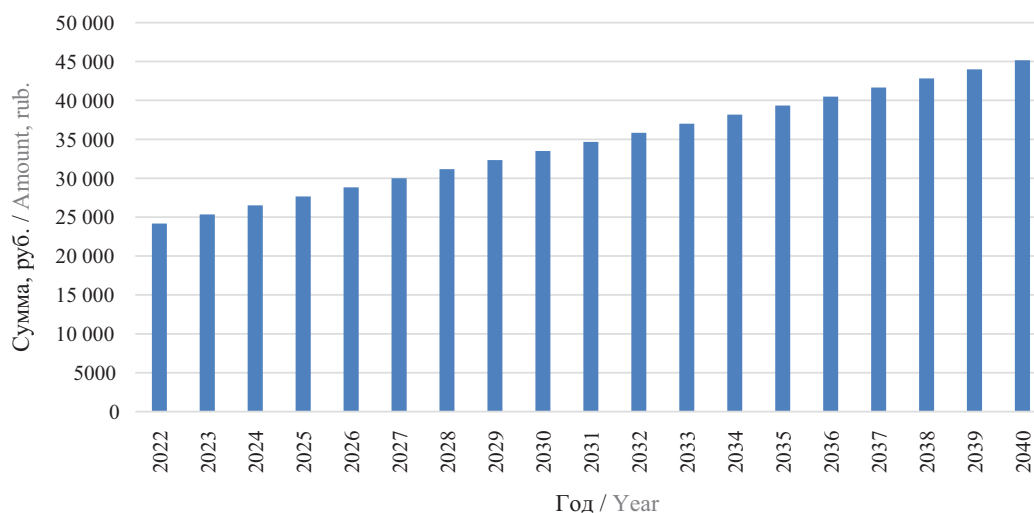
Используя данные, просчитали срок окупаемости установки. Если учитывать все факторы, то эта установка окупится через 19 лет постоянного использования со средним ростом цен на электричество, рассчитанным выше.

При среднем сроке службы солнечных панелей (25 лет), инвертора (25 лет) и аккумулятора (12 лет) потребуется замена последнего и диагностика всех узлов системы, поэтому придется заложить сумму большую, чем изначально, а именно стоимость диагностики и актуальных цен на аккумуляторы на настоящее время.

**Табл. 10.** Прогнозируемые цены на электроэнергию 2022–2039 гг. с учетом годовых затрат

**Table 10.** Projected electricity prices 2022–2036, taking into account annual costs

Год Year	Размер одноставочного тарифа, руб./кВт·ч The size of the single- rate tariff, rub/kW·h	Оплата одноставочного тарифа, руб./год Payment of the single- rate tariff, rub/year
2022	3,73	24 170,4
2023	3,91	25 336,8
2024	4,09	26 503,2
2025	4,27	27 669,6
2026	4,45	28 836
2027	4,63	30 002,4
2028	4,81	31 168,8
2029	4,99	32 335,2
2030	5,17	33 501,6
2031	5,35	34 668
2032	5,53	35 834,4
2033	5,71	38 167,2
2034	5,89	39 333,6
2035	6,07	40 500
2036	6,25	41 666,4
2037	6,43	42 832,8
2038	6,79	43 999,2
2039	7,15	45 165,6



**Рис. 9.** График динамики роста платежей с учетом роста цен на электроэнергию

**Fig. 9.** Graph of the dynamics of the growth of payments, taking into account the increase in electricity prices

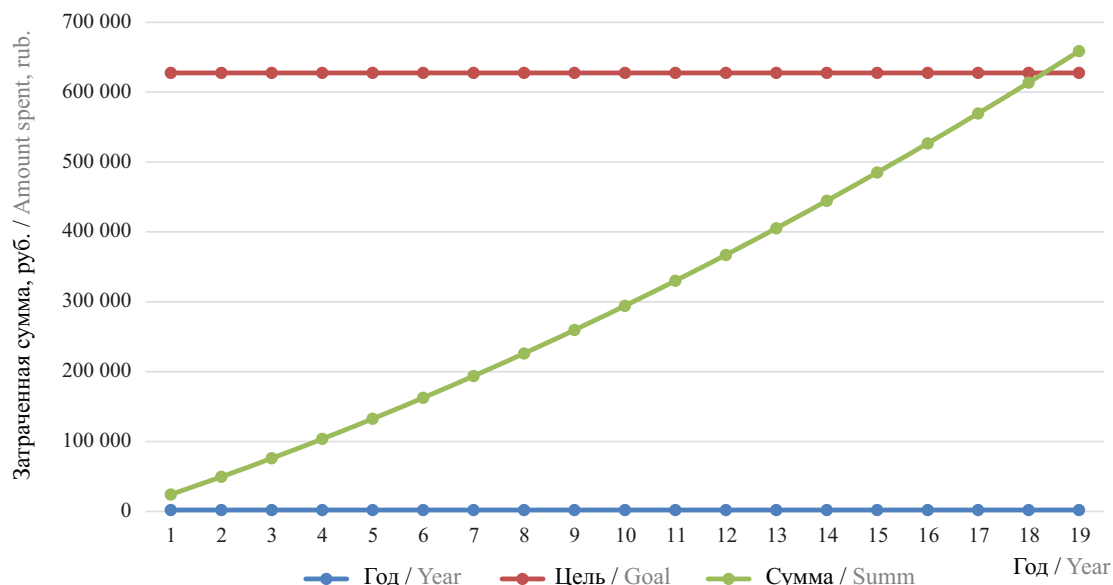


Рис. 10. Срок окупаемости солнечной установки с учетом роста цен на электроэнергию  
 Fig. 10. The payback period of the solar installation, taking into account the increase in electricity prices

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования выявили, что установка системы автономного обеспечения объекта малоэтажного строительства электроэнергией на солнечных элементах имеет очень большой срок окупаемости при расположении в Ленинградской области, при этом экономическая оценка показывает, что средства, потраченные на установку, целесо-

образно вложить на долгосрочный период, нежели платить за электроэнергию.

Подобное решение может быть эффективно в условиях безальтернативности источников энергии или нахождения в удалении от общей линии электропередач, так как затраты на прокладку энергосети будут аналогичными данной установке без учета затрат на оплату электричества по тарифу.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Attia S., Kurnitski J., Kosinski P., Borodinecs A., Deme Belafi Z., Istvan K. et al. Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 267. P. 112165. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112165
2. Zhang J., Zhao L., Deng S., Xu W., Zhang Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. Pp. 314–329. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.124
3. Дворецкий А.Т. Солнечная энергия в энергоэффективных зданиях // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году* : сб. науч. тр. РААСН. 2021. С. 61–73. EDN XAEDCY.
4. Соловьев А.К. Пассивные дома и энергетическая эффективность их отдельных элементов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 4. С. 46–53. EDN VWRCBL.
5. Коровкина А.И., Калинина А.И., Тагайчинова А.А., Голядкина А.Д. Пути повышения эффективности работы возобновляемых источников энергии // *Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации*. 2021. № 1 (22). С. 10–15. EDN NZDCBC.
6. Harjanne A., Korhonen J.M. Abandoning the concept of renewable energy // *Energy Policy*. 2019. Vol. 127. Pp. 330–340. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.12.029
7. Каплина Т.Ю. Выбор солнечной панели для жилого дома // *Евразийское научное объединение*. 2021. № 10–1 (80). С. 67–70. DOI: 10.5281/zenodo.5675899. EDN YTPPLK.
8. Андреев Р.А., Бонин И.Е. Метод достижения максимальной энергетической эффективности в солнечной панели // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2021. № 4–2 (72). С. 59–64. EDN EPWCZN.
9. Кравец Е.В., Звезова Е.А., Родионова А.Е., Савченко А.А. Использование солнечных батарей, как источник альтернативной электроэнергии // *Экономические аспекты технологического разви-*

тия современной промышленности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 87–93. EDN YRPCYQ.

10. *Селезнева А.С.* Солнечные батареи: плюсы и минусы альтернативных источников энергии // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : мат. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2018. С. 352–356. EDN YNYNOH.

11. *Gerarden T.D.* Demanding innovation: The impact of consumer subsidies on solar panel production costs // *Management Science*. 2023. DOI: 10.1287/mnsc.2022.4662

12. *Dutta R., Chanda K., Maity R.* Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 188. Pp. 819–829. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.023

13. *Guney T.* Solar energy, governance and CO<sub>2</sub> emissions // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 184. Pp. 791–798. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.124

14. Патент RU № 2703800 С1. Панель солнечной батареи / *Ануфриенко В.Е., Байбородов А.А., Васильва Т.С., Кузоро В.И., Григорьева Е.А., Волков М.В.*; заявл. № 2018142732 от 03.12.2018, опубл. 22.10.2019.

15. *Киричук Ю.Б., Ким А.А.* Солнечные панели и батареи в архитектуре // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2017. № 2. С. 123–129. EDN YKNIXL.

16. *Kant N., Singh P.* Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 3460–3470. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.116

17. *Zazoum B.* Solar photovoltaic power prediction using different machine learning methods // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 19–25. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.183

18. *Lazar I., Szegedi S., Toth T., Csakberenyi-Nagy G.* An estimation model based on solar geometry parameters for solar power production // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. Pp. 1636–1640. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.033

19. *Хохлов А.А.* Пассивный дом как инструмент энергоэффективности // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 996–998. EDN KASUYE.

20. *Алексеева Т.С., Беланова О.В.* Влияние географического положения Российской Федерации на выбор солнечных панелей // Новая наука: проблемы и перспективы. 2016. № 2–1 (61). С. 96–98. EDN VKMMAJ.

21. *Попова Я.С.* Перспективы внедрения гибридной солнечной электростанции в арктической зоне Якутии // Арктический вектор: стратегия развития : мат. II-й науч.-практ. конф. 2019. С. 113–116. EDN DXJNOM.

*Поступила в редакцию 17 февраля 2023 г.*

*Принята в доработанном виде 28 апреля 2023 г.*

*Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.*

**ОБ АВТОРАХ:** **Михаил Алексеевич Карташов** — магистр; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; kartashov.ma@edu.spbstu.ru;

**Екатерина Ивановна Иванова** — магистр; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ivanova2.ei@edu.spbstu.ru;

**Ксения Игоревна Стрелец** — доцент, директор центра дополнительных профессиональных программ Инженерно-строительного института, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 617762; strelec\_ki@spbstu.ru;

**Антон Евгеньевич Радаев** — доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 650856; radaev\_ae@spbstu.ru.

*Вклад авторов:*

*Карташов М.А.* — идея исследования, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы, расчеты, исследования.

*Иванова Е.И.* — идея исследования, сбор и обработка материала, написание и доработка исходного текста, итоговые выводы.

*Стрелец К.И.* — научное руководство.

*Радаев А.Е.* — научное руководство.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Attia S., Kurnitski J., Kosinski P., Borodinecs A., Deme Belafi Z., Istvan K. et al. Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe. *Energy and Buildings*. 2022; 267:112165. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112165
2. Zhang J., Zhao L., Deng S., Xu W., Zhang Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 70:314-329. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.124
3. Dvoretzkiy A.T. Solar energy in energy efficient buildings. *Fundamental, search and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020 : collection of scientific papers of the RAASN*. 2021; 61-73. EDN XAEDCY. (rus.).
4. Solovov A.K. "Passive Houses" and energy efficiency of their architectural and structural elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 4:46-53. EDN VWRCLB. (rus.).
5. Korovkina A.I., Kalinina A.I., Tagaichinova A.A., Golyadkina A.D. Ways to improve the efficiency of renewable energy sources. *Urban Planning, Infrastructure, Communications*. 2021; 1(22):10-15. EDN NZDCBC. (rus.).
6. Harjanne A., Korhonen J.M. Abandoning the concept of renewable energy. *Energy Policy*. 2019; 127:330-340. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.12.029
7. Kaplina T.Y. Selecting a solar panel for a residential building. *Eurasian Scientific Association*. 2021; 10-1(80):67-70. DOI: 10.5281/zenodo.5675899. EDN YTPPLK. (rus.).
8. Andreev R.A., Bunin I.E. A method for achieving maximum energy efficiency in a solar panel. *Actual Scientific Research in the Modern World*. 2021; 4-2(72):59-64. EDN EPWCZN. (rus.).
9. Kravets E.V., Zvekova E.A., Rodionova A.E., Savchenko A.A. The use of solar panels as a source of alternative electricity. *Economic aspects of the technological development of modern industry : materials of the International scientific and practical conference*. 2017; 87-93. EDN YRPCYQ. (rus.).
10. Selezneva A.S. Solar batteries: pros and cons of alternative energy sources. *Improving the efficiency of production and energy use in Siberia : materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 2018; 352-356. EDN YNYNOH. (rus.).
11. Gerarden T.D. Demanding innovation: The impact of consumer subsidies on solar panel production costs. *Management Science*. 2023. DOI: 10.1287/mnsc.2022.4662
12. Dutta R., Chanda K., Maity R. Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis. *Renewable Energy*. 2022; 188:819-829. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.023
13. Guney T. Solar energy, governance and CO<sub>2</sub> emissions. *Renewable Energy*. 2022; 184:791-798. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.124
14. Patent RU No. 2703800 C1. *Solar panel* / Anufrienko V.E., Baiborodov A.A., Vasilva T.S., Kuzoro V.I., Grigorieva E.A., Volkov M.V.; dec. No. 2018142732 dated 03.12.2018, publ. 22.10.2019. (rus.).
15. Kirichuk Yu.B., Kim A.A. Solar panels and batteries in architecture. *New ideas of the new century : materials of the International Scientific Conference of the FAD PNU*. 2017; 2:123-129. EDN YKNIXL. (rus.).
16. Kant N., Singh P. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:3460-3470. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.116
17. Zazoum B. Solar photovoltaic power prediction using different machine learning methods. *Energy Reports*. 2022; 8:19-25. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.183
18. Lazar I., Szegedi S., Toth T., Csakberenyi-Nagy G. An estimation model based on solar geometry parameters for solar power production. *Energy Reports*. 2020; 6:1636-1640. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.033
19. Khokhlov A.A. Passive house as an energy efficiency tool. *Investments, construction, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population : materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2019; 996-998. EDN KASUYE. (rus.).
20. Alekseeva T.S., Belanova O.V. Influence of the geographical position of the Russian Federation on the choice of solar panels. *New Science: Problems and Prospects*. 2016; 2-1(61):96-98. EDN VKMMAJ. (rus.).
21. Popova Ya.S. Prospects for the introduction of a hybrid solar power plant in the Arctic zone of Yakutia. *Arctic vector: development strategy : materials of the II scientific and practical conference*. 2019; 113-116. EDN DXJNOM. (rus.).

Received February 17, 2023.

Adopted in revised form on April 28, 2023.

Approved for publication on June 6, 2023.

BIONOTES: **Mikhail A. Kartashov** — master; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; kartashov.ma@edu.spbstu.ru;

**Ekaterina I. Ivanova** — master; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ivanova2.ei@edu.spbstu.ru;

**Kseniya I. Strelets** — Associate Professor, Director of the Center for Additional Professional Programs Civil Engineering Institute, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 617762; strelec\_ki@spbstu.ru;

**Anton E. Radaev** — Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 650856; radaev\_ae@spbstu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Mikhail A. Kartashov* — the idea of research, collection of material, processing of material, writing of the source text, final conclusions, calculations, research.

*Ekaterina I. Ivanova* — the idea of research, collection of material, processing of material, writing and revision of the source text, final conclusions.

*Kseniya I. Strelets* — scientific guide.

*Anton E. Radaev* — scientific guide.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147

## Основные принципы формирования организационно-технологической платформы научно-технического сопровождения уникальных объектов

Азарий Абрамович Лапидус, Ирина Сергеевна Шевченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Научно-техническое сопровождение (НТС) выступает современным инструментом контроля качества и безопасности при реализации уникальных объектов капитального строительства. Как самостоятельный вид деятельности НТС имеет большое количество направлений, взаимодействий и осуществляемых процессов при его проведении. Однако наряду со значимым вкладом НТС в реализацию уникальных зданий и сооружений, оно имеет ряд несовершенств и открытых вопросов. Решить их предлагается путем привлечения новой терминологии и способа организации НТС в единую структуру — организационно-технологическую платформу научно-технического сопровождения уникальных объектов (ОТП НТС).

**Материалы и методы.** С целью формирования организационно-технологической платформы НТС рассматривается с позиций системотехники и при применении системного подхода. Платформенное представление деятельности НТС дает возможность структурировать существующие направления и взаимодействия НТС в единое платформенное пространство. Для формализации взаимодействия элементов ОТП НТС предлагается использовать метод дерева целей с разложением целей платформы по уровням.

**Результаты.** Определение основных подсистем ОТП НТС: Участники, Процессы, База данных работ, позволило сформулировать понятие ОТП НТС. Для получения необходимого результата от деятельности ОТП НТС требуется совместная работа всех ее элементов. Использование метода дерева целей дало возможность произвести поуровневую декомпозицию целей, где на верхнем уровне — генеральная цель платформы, далее — проблемы (задачи), которые являются целями подсистем платформы, на нижнем уровне — направления решений (комплекс мероприятий, направленных на достижение целей вышестоящего уровня).

**Выводы.** Организационно-технологическая платформа научно-технического сопровождения — это совокупность основных элементов НТС, основанная на взаимодействии реализуемых участниками уникального строительного проекта процессах, протекающих при НТС, и использовании базы данных работ с целью достижения результата деятельности НТС. Достижение целей подсистем платформы позволит устранить имеющиеся недостатки деятельности НТС, что в дальнейшем положительно отразится не только на результате выполнения НТС, но и в части сроков организации данного процесса, а следовательно, и сроков реализации строительного проекта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** уникальные объекты, сложная система, подсистемы, научно-техническое сопровождение, технологическая платформа, метод дерева целей, цели, проблемы (задачи), направления решений, декомпозиция

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лапидус А.А., Шевченко И.С. Основные принципы формирования организационно-технологической платформы научно-технического сопровождения уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1138–1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147

Автор, ответственный за переписку: Ирина Сергеевна Шевченко, isshev@mail.ru.

## Main principles of the formation of organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects

Azariy A. Lapidus, Irina S. Shevchenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Scientific and technical support (STS) is a modern tool for quality and safety control when realizing unique objects of capital construction. As an independent activity, STS has a large number of directions, interactions and processes carried out in its implementation. However, along with the significant contribution of STS in the realization of unique buildings

and structures, it has a number of imperfections and open issues. It is proposed to solve them by using new terminology and the method of STS organization in a single structure — the organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects (OTP STS).

**Materials and methods.** In order to form an organizational and technological platform, the STS is considered from the standpoint of systems engineering and the application of a systematic approach. The platform representation of STS activities makes it possible to structure the existing directions and interactions of STS into a single platform space. To formalize the interaction between the elements of the OTP STS, it is proposed to use the goal tree method with the decomposition of the platform objectives into levels.

**Results.** Identification of the main subsystems of the OTP STS: Participants, Processes, Database of works, allowed to formulate the concept of the OTP STS. In order to obtain the necessary result from the activities of the OTP STS, all its elements need to work together. The use of the goal tree method made it possible to perform a level-by-level decomposition of goals, where at the top level — the general goal of the platform, then — problems (tasks) that are the goals of the platform subsystems, at the bottom level — directions of decisions (a set of measures aimed at achieving the goals of a higher level).

**Conclusions.** Organizational and technological platform of scientific and technological support is a set of basic elements of STS, based on the interaction of the processes implemented by the participants of a unique construction project that occur during scientific and technical support, and the use of a database of work in order to achieve the result of STS. Achievement of objectives of platform subsystems will allow to eliminate existing shortcomings of STS activity that will positively influence not only on result of STS performance, but also on terms of organization of this process and, hence, on terms of construction project realization.

**KEYWORDS:** unique objects, complex system, subsystems, scientific and technical support, technological platform, goal tree method, goals, problems (tasks), directions of solutions, decomposition

**FOR CITATION:** Lapidus A.A., Shevchenko I.S. Main principles of the formation of organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1138-1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147 (rus.).

*Corresponding author:* Irina S. Shevchenko, [isshev@mail.ru](mailto:isshev@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительные темпы развития городского пространства в мире и в нашей стране, обусловленные ростом городского населения, ставят перед экспертами строительной отрасли задачу увеличения городских территорий и площадей с целью создания комфортной городской среды для жизни, развития и деятельности человека. Одним из способов решения этой задачи является строительство уникальных, технически и конструктивно сложных возводимых объектов, которые предусматривают рациональное и комплексное использование вертикального и подземного пространства. К таким объектам предъявляются особые требования по качеству и безопасности ввиду различных усложняющих реализацию данных объектов характеристик. Часто объекты высотного и подземного строительства, согласно Градостроительному кодексу Российской Федерации<sup>1</sup>, относятся к уникальным, так как достигают высоты более 100 м и заглубления подземной части фундамента ниже планировочной отметки земли более чем на 15 м. К уникальным объектам также относятся объекты, в проектной документации которых предусмотрено наличие пролетов более 100 м и консоли более 20 м.

Системой технического регулирования РФ предусмотрен современный инструмент контроля качества и безопасности уникальных объектов — научно-техническое сопровождение (далее — НТС), выполняемое специализированными организациями и позволяющее обеспечить качество строительства

и надежность зданий и сооружений, с использованием комплекса работ научного, методического, информационного и экспертно-контрольного характера<sup>2</sup>.

Представленное исследование посвящено возникшей необходимости рассмотрения НТС как целостного комплекса взаимосвязанных структурных элементов, так как нормативно-техническая документация и существующие исследования не дают четкого, единого и наиболее прозрачного видения данной деятельности в строительстве. Такой подход должен учитывать большое количество направлений:

- НТС уникальных объектов с различными характеристиками [1, 2];
- существующий опыт проведения НТС [3, 4];
- НТС на различных этапах жизненного цикла уникальных объектов [5, 6];
- состав работ, выполняемых в рамках НТС, приведенных в различных нормативно-технических документах и методических рекомендациях;
- периодичность проведения работ;
- требования к специализированным организациям, выполняющим НТС;
- участники процесса НТС.

Некоторые из выше сформулированных направлений уже становились предметом существующих исследований в данной области, но по отдельности и с привязкой к конкретным характеристикам или реализуемым объектам. Также имеющиеся под-

<sup>2</sup> Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. Первая редакция : МРДС 02–08 : утв. в ОАО «КТБ ЖБ», введ. 01.01.2008. М., 2008.

<sup>1</sup> Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 19.12.2022).

ходы содержат ряд несовершенств и открытых вопросов указанной деятельности, таких как:

- нечеткие рекомендации к организации процесса выполнения НТС на различных стадиях жизненного цикла (инженерные изыскания, проектирование, строительство, также встречаются упоминания о привлечении специализированных организаций к проведению НТС на стадиях: эксплуатации [3, 7], демонтажа и предпроектной подготовки [8]);
- разрозненные рекомендации к составу работ, выполняемых в рамках НТС, в различных нормативно-технических документах и методических рекомендациях;
- неопределенные требования к организациям, выполняющим НТС.

Поэтому появилась необходимость исследования такого подхода к НТС, который бы позволил создать связи между существующими направлениями, учитывая их как единое целое, и при этом устранить имеющиеся недостатки данной деятельности.

По мнению авторов, такой подход можно осуществить с применением концепции технологических платформ. Платформенное представление содержит много ключевых преимуществ, так как способно наращивать ценность конечных продуктов и услуг путем масштабирования бизнес-моделей и покомпонентной реализацией своих предложений [9]. Платформы служат эффективным механизмом коллаборации [10] и выполняют организующую роль, которая предоставляет участвующим в ней сторонам инструменты и стандарты для взаимодействия [11–13].

На основании вышеизложенного предметом данного исследования является организационно-технологическая платформа научно-технического сопровождения уникальных объектов (ОТП НТС), целью исследования — определение основных направлений и принципов формирования ОТП НТС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Впервые предложение о возможности рассмотрения деятельности НТС с использованием централизованного системного и комплексного подходов было изложено в статье [14]. Поскольку НТС рассматривается как сложная система, то ее платформенное построение будет осуществляться с позиций системотехники с помощью системного подхода, который позволяет рассмотреть НТС как систему, с соблюдением основных принципов существования систем [15]. Принцип системности дает возможность представить НТС как сложную систему. Принцип целостности позволяет рассмотреть систему НТС как единое целое и одновременно как подсистему вышестоящей системы (научно-техническое сопровождение уникального объекта – возведение уникального объекта капитального строительства – реализация крупномас-

штабных строительных проектов). Принцип иерархичности строения отражает наличие множества элементов в исследуемой системе НТС, расположенных на низшем уровне, и наличие их подчинения элементам высшего уровня. Принцип структуризации позволяет исследовать и анализировать элементы системы НТС уникальных объектов и их взаимосвязи как компонентов в рамках отдельной организационной структуры. Принцип множественности, как элемент познания принципиально сложной системы, дает возможность применять для описания исследуемых элементов и системы в целом различные виды моделей, каждая из которых может описать какой-либо определенный аспект системы (но все они связаны и подчинены общей цели). Объединение всех принципов вместе позволяет сформировать сложную систему, направленную на достижение высоких и эффективных показателей реализации деятельности НТС.

В работе [9] отмечено, что технологические платформы тоже являются специфическими системами, которые способны организовать технические, информационные и интеллектуальные активы в цифровую среду. Платформа выступает в роли коммуникационной площадки, которая выстраивает необходимые взаимодействия для достижения поставленных ей задач с помощью различных подходов (процессный, системный, ситуационный, количественный) и технологий. Исследования [16, 17] доказывают, что использование платформенного подхода применительно к строительству в целом, но все еще отсутствует достаточное количество исследований и практического использования информации на основе платформ для совершенствования строительной отрасли.

В контексте данного исследования технологическая платформа может выступить способом интеграции уже существующих подходов к НТС и пространством для организации данной деятельности. Поэтому далее в работе авторы используют термин «организационно-технологическая платформа». Используя платформенную модель, удастся создать единый подход к НТС, структурировав при этом уже существующие направления и компенсировав недостатки.

Представление НТС в виде ОТП требует формализации полученных в ходе исследования элементов. Основываясь на труды [18, 19], в качестве необходимого для исследования метода при формировании организационно-технологических платформ в строительстве возможно применение метода дерева целей (ДЦ). Дерево целей — «это упорядоченная иерархия целей, выражающая их соподчинение и внутренние взаимосвязи» [20]. При построении ДЦ происходит декомпозиция — разложение целей по уровням, из которой следует их упрощение, конкретизация и уточнение.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Так как НТС рассматривается как сложная система с соблюдением основных принципов существования систем, следовательно, она обладает подсистемами. На рис. 1 авторы статьи показывают, как имеющееся состояние НТС можно структурировать поэлементно в подсистемы платформы НТС. Отмечено, что рассмотрение и построение ОТП со всеми ее направлениями и взаимодействиями происходит только в контексте организации и выполнения НТС.

Для того чтобы сформулировать главное понятие данного исследования, были определены основные подсистемы: Участники, Процессы, База данных работ. Целью ОТП является достижение результата деятельности НТС, а именно обеспечение качества строительства, надежности, безопасности, функциональной пригодности и долговечности зданий и сооружений с различными уникальными характеристиками.

На основании вышеизложенного организационно-технологическая платформа научно-техниче-

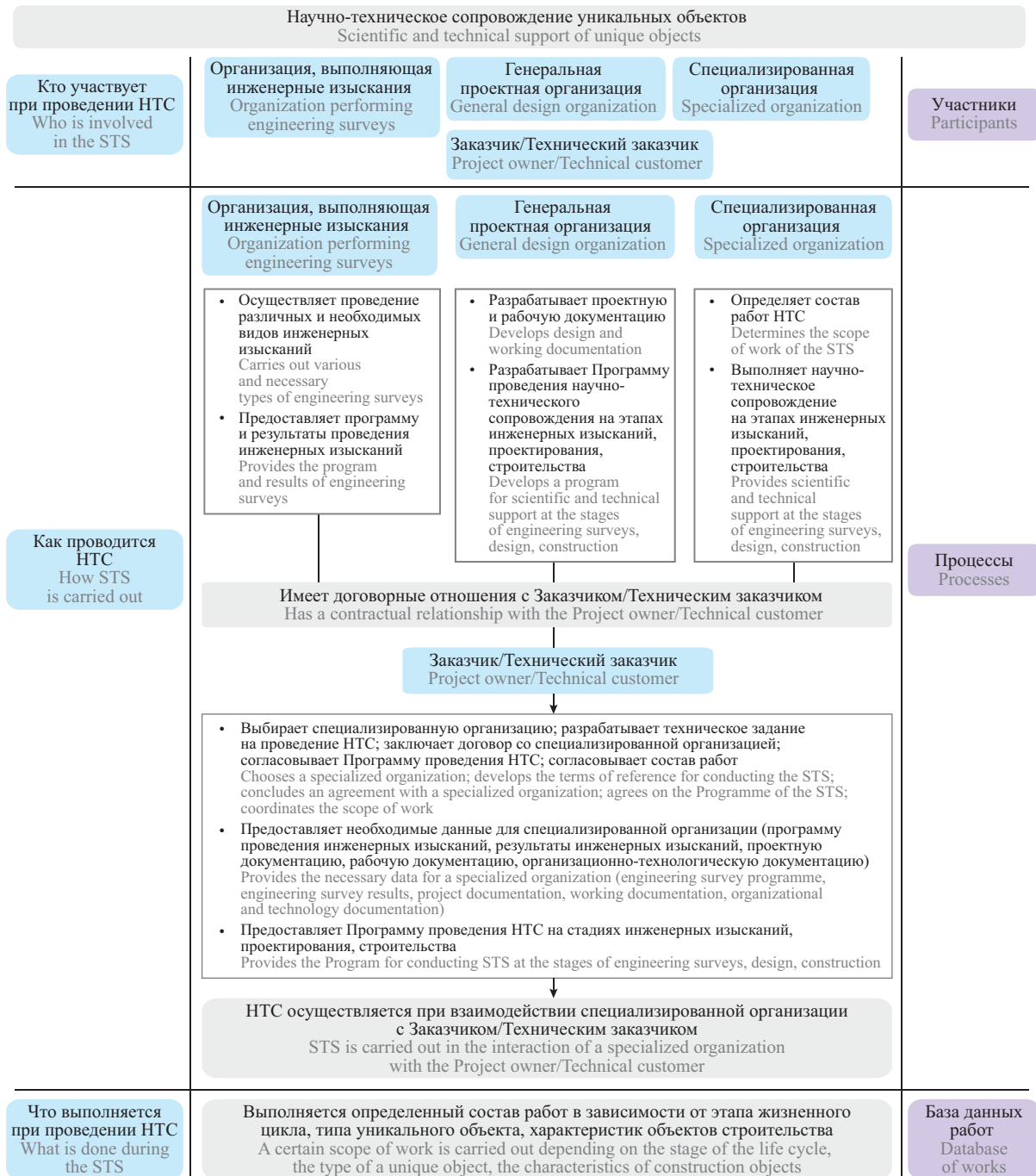


Рис. 1. Структуризация элементов и существующих взаимодействий при проведении НТС

Fig. 1. Structuring of elements and existing interactions during the STS

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18, Выпуск 7, 2023  
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18, Issue 7, 2023

ского сопровождения — это совокупность основных элементов научно-технического сопровождения, основанная на взаимодействии реализуемых участниками уникального строительного проекта процессов, протекающих при научно-техническом сопровождении, и использовании базы данных работ с целью достижения результата деятельности НТС (рис. 2).

Для представления ОТП в виде формальной системы возможно использование метода дерева целей. Построение ДЦ осуществляется от общей цели к частным — сверху вниз, а анализ ДЦ проводится в обратном порядке.

Данный метод позволяет получить устойчивую структуру целей, проблем (задач) и направлений решений. Дерево целей тесно увязывает между собой перспективные цели и конкретные задачи на каждом уровне иерархии. При этом цель высшего порядка соответствует вершине дерева, а ниже в несколько ярусов располагаются локальные цели (задачи), с помощью которых обеспечивается достижение целей верхнего уровня. Таким образом, дерево целей имеет одну вершину, называемую корнем, который характеризует генеральную цель платформы Ц<sup>0</sup> и располагается на верхнем (нулевом) уровне  $i = 0$ . Далее цель высшего уровня декомпозируется

на цели первого уровня  $i = 1$ , отражающие существующие проблемы (задачи) Ц<sup>1</sup><sub>01</sub>, Ц<sup>1</sup><sub>02</sub>, ... Ц<sup>1</sup><sub>0n</sub>. Затем на цели второго уровня  $i = 2$ , которые отражают направления решений для достижения целей первого уровня  $i = 1$  Ц<sup>2</sup><sub>011</sub>, Ц<sup>2</sup><sub>012</sub>, ... Ц<sup>2</sup><sub>01n</sub>, и так далее для каждой цели первого уровня.

На рис. 3 авторы данного исследования предлагают, каким образом могут быть расположены уровни дерева целей ОТП НТС. Так как ранее уже была определена цель ОТП НТС, она же и является генеральной целью в дереве целей — достижение результата деятельности НТС. На первом уровне предлагается расположить цели подсистем, определенных на рис. 1, 2, которые отражают существующие проблемы (задачи) НТС (в исследовании они указаны в качестве несовершенств и открытых вопросов). Затем необходимо проведение дополнительного комплекса исследований для определения, какие цели будут являться целями второго уровня и отражать направления решений.

Согласно рис. 3, цели первого уровня  $i = 1$  отражают цели подсистем ОТП НТС. Для подсистемы «Участники» целью может быть выбор необходимых специализированных организаций для проведения НТС. Так как авторы рассматривают платформу только в контексте организации и прове-

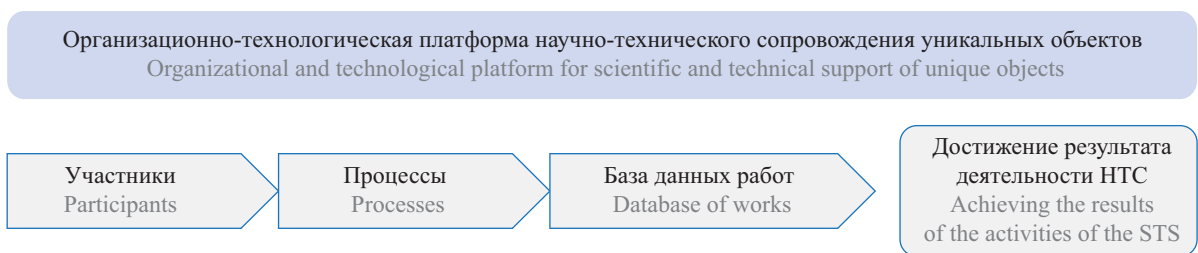


Рис. 2. Визуальное представление ОТП НТС

Fig. 2. Visual representation of OTP STS

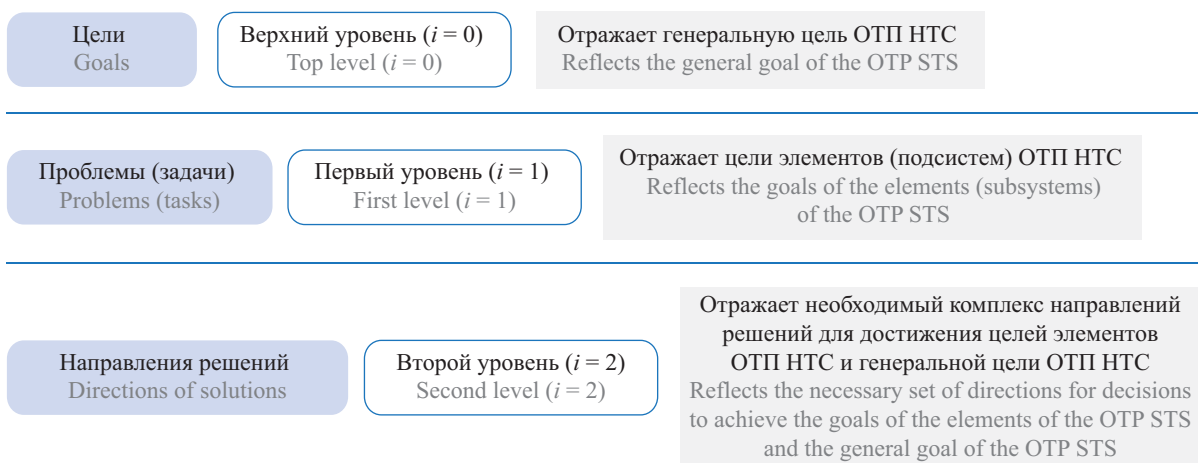


Рис. 3. Уровни дерева целей ОТП НТС

Fig. 3. Levels of the OTP STS Goal Tree

дения научно-технического сопровождения, то, кроме того, что эта подсистема объединяет участников строительного проекта, задействованных при проведении НТС (рис. 1), она также может содержать требования к специализированным организациям, выполняющим НТС.

Для подсистемы «Процессы» целью можно принять сокращение временных затрат и принимаемых решений при проведении НТС. Предполагается, что этот элемент платформы выстраивает взаимоотношения между участниками уникального строительного проекта, отражает процессы при организации и проведении НТС, а также вариативность принимаемых решений в процессах при осуществлении НТС.

Целью подсистемы «База данных работ» выступает разработка принципа автоматизированного выбора работ с учетом характеристик строительного объекта. Так как при проведении НТС выполняется определенный состав работ в зависимости от этапа жизненного цикла, типа уникального объекта и его характеристик, авторы исследования считают, что данная подсистема должна содержать максимально возможный перечень работ, выполняемых при НТС, а также иметь возможность автоматизировать принцип их выбора.

В таблице представлены цели ОТП НТС и их соответствие структурным элементам организационно-технологической платформы.

Для разрешения указанных несовершенств деятельности НТС и создания комплекса мероприятий по достижению целей каждой подсистемы  $i = 1$  следует провести их декомпозицию на цели второго уровня  $i = 2$ , которые являются направлениями решений для достижения целей подсистем ОТП НТС, а следовательно, и генеральной цели ОТП НТС. В качестве примера можно привести направления решений для  $\Pi_{01}^1$  — привлечение необходимых специализированных организаций для проведения НТС: опыт выполнения НТС при реализации уникальных объектов; наличие требуемого программного обеспечения для расчетов и обработки результатов, полученных при НТС; наличие специалистов, имеющих квалификацию в области инженерных изысканий, проектирования и строительства.

Таким же образом можно декомпозировать другие цели первого уровня:

- $\Pi_{02}^1$  — сокращение временных затрат и принимаемых решений в процессе НТС: проведение НТС на каждой стадии жизненного цикла строительного объекта последовательно (инженерные изыскания – проектирование – строительство); формирование единого процессного подхода к функционированию НТС;
- $\Pi_{03}^1$  — разработка принципа автоматизированного выбора работ с учетом характеристик строительного объекта: формирование единой базы данных работ, выполняемых при НТС на основе нормативно-технической документации и опыта осуществления НТС на различных уникальных объектах; разработка принципа выбора работ на основе алгоритма, который учитывал бы не только уникальные характеристики строительных объектов, но и их конструктивные особенности, а также этапы ЖЦ реализации проекта.

Более детальное рассмотрение всего комплекса направлений решений  $i = 2$  для достижения це-

#### Цели нулевого и первого уровня дерева целей ОТП НТС

Goals of the zero and first levels of the tree of goals of the OTP STS

Уровень ДЦ Level of goal tree	Наименование цели Name of goal	Соответствие элементам организационно-технологической платформы Compliance with the elements of the organizational and technological platform
$i = 0$	$\Pi^0$ — достижение результата деятельности НТС $G^0$ — achievement of the results of the STS activities	Генеральная цель платформы General goal of the platform
$i = 1$	$\Pi_{01}^1$ — привлечение необходимых специализированных организаций для проведения НТС $G_{01}^1$ — involvement of the necessary specialized organizations for the STS	Цель подсистемы «Участники» The goal of the subsystem “Participants”
	$\Pi_{02}^1$ — сокращение временных затрат и принимаемых решений в процессе НТС $G_{02}^1$ — reduction of time costs and decisions made in the STS process	Цель подсистемы «Процессы» The goal of the subsystem “Processes”
	$\Pi_{03}^1$ — разработка принципа автоматизированного выбора работ с учетом характеристик строительного объекта $G_{03}^1$ — development of the principle of automated selection of works, taking into account the characteristics of the construction object	Цель подсистемы «База данных работ» The goal of the subsystem “Database of works”

лей подсистем ОТП НТС  $i = 1$ , а следовательно, и генеральной цели  $i = 0$  в контексте всей деятельности НТС и всех этапов ЖЦ требует математической формализации, например, при помощи метода априорного ранжирования с привлечением экспертов. Экспертами могут выступить специалисты в области проектирования и строительства уникальных объектов капитального строительства, а также имеющие опыт при реализации строительных проектов со сложными, нестандартными и не апробированными ранее архитектурными и конструктивными решениями. Для этого строится матрица целей ОТП НТС и для каждой группы целей второго уровня (комплекса направлений решений), соответствующей конкретной подсистеме, экспертами проводится ранжирование. В основу рассуждений положена статистическая обработка данных, полученных от экспертов с целью получения вклада [20], выражаемого в численном показателе и отражающем, какой вклад цель нижестоящего уровня вносит в цель вышестоящего. Таким образом можно будет оценить вклад каждой цели второго уровня в цель первого уровня ( $\Pi_{01}^1, \Pi_{02}^1, \Pi_{03}^1$ ), соответствующей конкретной подсистеме ОТП НТС, и в генеральную цель платформы  $\Pi^0$ , и определить наиболее значимые.

Следующим этапом формирования ОТП НТС является разработка комплекса мероприятий, учитывающего наиболее значимые цели и отражающего применимое на практике функциональное назначение каждой подсистемы. Например, в статье [5] авторы уже исследовали разработку модели программы, которая обеспечит автоматизированный выбор работ согласно предлагаемым параметрам для уникальных зданий и сооружений с большим заглублением. Данная концепция с учетом значимых целей для ОТП НТС может быть основой для формирования подсистемы «База данных работ» и соответствующей ей цели  $\Pi_{03}^1$  — разработка принципа автоматизированного выбора работ с учетом характеристик строительного объекта.

Детальная разработка и определение необходимых направлений решений для достижения целей каждой из подсистем организационно-технологической платформы, а также их дальнейшее применение в контексте каждой подсистемы ОТП НТС станут предметом дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение платформенного подхода дает возможность исследовать деятельность НТС как комплекс взаимосвязанных структурных элементов. Интеграция существующих направлений, различных взаимодействий и процессов в организационно-технологическую платформу позволяет создать единую структуру и общий подход к деятельности НТС.

На основании представления НТС как сложной системы с соблюдением основных принципов существования систем авторы формируют понятие ОТП НТС и определяют присущие ей подсистемы: Участники, Процессы, База данных работ.

Для формализации взаимодействия элементов ОТП НТС предлагается использовать метод дерева целей с декомпозицией целей элементов платформы. Используя данный метод, генеральная цель платформы (целью нулевого уровня  $i = 0$ ) — достижение результата деятельности НТС, а именно обеспечение надежности и достоверности всех видов изысканий, контроля качества проектирования, оценки достоверности и корректности принятых подходов при проектировании (в части конструктивных и организационно-технологических решений), обеспечение соответствия объекта утвержденной проектной документации и рабочей документации, контроля безопасности и надежности при строительстве. Цели первого уровня  $i = 1$  являются целями соответствующих подсистем ОТП НТС.

Авторы статьи отмечают, что при рассмотрении целей первого уровня  $i = 1$  можно решить существующие недостатки деятельности НТС:

- $\Pi_{01}^1$  — привлечение необходимых специализированных организаций для проведения НТС: до сих пор существует неопределенность в предъявляемых требованиях к организациям, выполняющим НТС, поэтому требуется установление и соблюдение единых исчерпывающих требований к таким организациям;
- $\Pi_{02}^1$  — сокращение временных затрат и принимаемых решений в процессе НТС: нечеткие рекомендации к организации процесса выполнения НТС на различных стадиях жизненного цикла требуют разработки организационных аспектов деятельности НТС и создания единого регламента проведения данной деятельности в контексте всего жизненного цикла;
- $\Pi_{03}^1$  — разработка принципа автоматизированного выбора работ с учетом характеристик строительного объекта: ввиду разрозненных рекомендаций к составу работ, выполняемых в рамках НТС, в различных сводах правил и методических рекомендациях необходимо повышение качества выполнения данных работ и разработка однозначных алгоритмов, особенностей и принципов выбора работ, входящих в состав НТС, для различных характеристик уникальных объектов.

Дальнейшими направлениями данного исследования являются декомпозиция целей первого уровня на направления решений и разработка комплекса мероприятий, позволяющего достичь не только результата деятельности НТС, но и сокращения сроков реализации организационных аспектов этой деятельности, а следовательно, и сроков реализации уникального строительного объекта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Kapyrin P., Sevryugina N.* The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042018. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042018
2. *Леонтьев Е.В., Газизов Р.Ю.* Научно-техническое сопровождение при проектировании объектов производственного и гражданского назначения повышенного уровня ответственности // Вестник государственной экспертизы. 2020. № 1. С. 54–59.
3. *Ведаков И.И., Конин Д.В.* Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства высотных зданий на примере комплекса в Санкт-Петербурге // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 10. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.04-11. EDN DHDXMW.
4. *Ведаков И.И., Фарфель М.И.* Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации при реконструкции большой спортивной арены «Лужники» в г. Москва к чемпионату мира по футболу в 2018 году // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3 (22). С. 27–41.
5. *Ланидус А.А., Топчий Д.В., Шевченко И.С.* Концепция разработки модели программы по научно-техническому сопровождению жизненного цикла уникальных зданий с большим заглублением // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 298–313. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.298-313
6. *Шевченко И.С., Погодин Д.А.* Необходимость научно-технического сопровождения жизненного цикла зданий и сооружений с заглублением подземной части более 15 метров // Строительное производство. 2021. № 1. С. 48–57. DOI: 10.54950/26585340\_2021\_1\_48. EDN QRAGRA.
7. *Ведаков И.И., Еремеев П.Г., Соловьев Д.В.* Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 14–19. EDN VRJMYQ.
8. *Еремеев П.Г., Ведаков И.И.* Проектирование и возведение металлических конструкций большепролетных уникальных зданий и сооружений // Строительные материалы. 2017. № 4. С. 55–58. EDN YNESEV.
9. *Гитelman Л.Д., Кожевников М.В., Рыжук О.Б.* Технология ускоренного трансфера знаний для опережающего обучения специалистов цифровой экономики // Экономика региона. 2020. Т. 16. № 2. С. 435–448. DOI: 10.17059/2020-2-8. EDN OSFHSI.
10. *Gitelman L.D., Sandler D.G., Kozhevnikov M.V.* University technology platform of anticipatory learning // Economy of Region. 2016. Pp. 257–266. DOI: 10.17059/2016-1-20
11. *Weking J., Stöcker M., Kowalkiewicz M., Böhm M., Krcmar H.* Leveraging industry 4.0 — A business model pattern framework // International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 225. P. 107588. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107588
12. *Schulze F., Dallasega P.* Industry 4.0 concepts and lean methods mitigating traditional losses in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: A framework // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 51. Pp. 1363–1370. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.190
13. *Gawer A.* Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework // Research Policy. 2014. Vol. 43. Issue 7. Pp. 1239–1249. DOI: 10.1016/j.respol.2014.03.006
14. *Ланидус А.А.* Научно-техническое сопровождение изысканий, проектирования и строительства как обязательный элемент достижения требуемых показателей проекта // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 11. С. 1428–1437. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437
15. *Гусаков А.А., Богомолов Ю.М., Брехман А.И., Ваганян Г.А., Вайнштейн М.С., Владимировский С.Р. и др.* Системотехника строительства: энциклопедический словарь. М. : Изд-во АСВ, 2004. 320 с.
16. *Liu D., Wang H., Lu H.* Composition of construction services with hierarchical planning on digital platform // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104449. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104449
17. *Wu W., Xie L., Hao J.L.* An integrated trading platform for construction and demolition waste recovery in a circular economy // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2022. Vol. 25. Pp. 100597. DOI: 10.1016/j.scp.2022.100597
18. *Ланидус А.А.* Формирование организационно-технологических платформ в строительстве // Строительное производство. 2022. № 1. С. 2–6. DOI: 10.54950/26585340\_2022\_1\_2. EDN PYQGHU.
19. *Ланидус А.А.* Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524
20. *Кузнецов Е.С.* Управление техническими системами : учебное пособие. М. : МАДИ (ГТУ), 2003. 247 с.

Поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Азарий Абрамович Лapidус** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearchID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; LapidusAA@mgsu.ru;

**Ирина Сергеевна Шевченко** — аспирант кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8956-4069, ResearchID: ADV-6241-2022, ORCID: 0000-0003-1046-9016; isshev@mail.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Kapurin P., Sevryugina N. The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042018. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042018
2. Leontiev E.V., Gazizov R.Yu. Scientific and technical support in the design of industrial and civil facilities with a higher level of responsibility. *Bulletin of State Expertise*. 2020; 1:54-59. (rus.)
3. Vedyakov I.I., Konin D.V. Scientific and technical support of design and construction of high-rise buildings on the example of the complex in St. Petersburg. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 10:4-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.04-11. EDN DHDXMW. (rus.)
4. Vedyakov I., Farfel M. Scientific and technical support of design, manufacture, installation and operation during the reconstruction of grand sports arena “Luzhniki” in Moscow to the football world cup in 2018. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019; 3(22):27-41. EDN OKIDJJ. (rus.)
5. Lapidus A.A., Topchiy D.V., Shevchenko I.S. The concept for developing a programme model for the scientific and technical support of lifecycles of unique deeply embedded buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(3):298-313. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.298-313 (rus.)
6. Shevchenko I.S., Pogodin D.A. The need for scientific and technical support of the life cycle of buildings and structures with an embedment of the underground part by more than 15 meters. *Construction Production*. 2021; 1:48-57. DOI: 10.54950/26585340\_2021\_1\_48. EDN QRAGRA. (rus.)
7. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Solovyev D.V. Scientific and technical support and standard requirements when realizing projects of buildings and structures with increased level of responsibility. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 12:14-19. EDN VRJMYQ. (rus.)
8. Ereemeev P.G., Vedyakov I.I. Design and erection of metal structures of large-span unique buildings and facilities *Construction Materials*. 2017; 4:55-58. EDN YNESEV. (rus.)
9. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Ryzhuk O.B. Technology of accelerated knowledge transfer for anticipatory training of specialists in digital economy. *Economy of Regions*. 2020; 16(2):435-448. DOI: 10.17059/2020-2-8. EDN OSFHSI. (rus.)
10. Gitelman L.D., Sandler D.G., Kozhevnikov M.V. University technology platform of anticipatory learning. *Economy of Region*. 2016; 257-266. DOI: 10.17059/2016-1-20
11. Weking J., Stöcker M., Kowalkiewicz M., Böhm M., Krcmar H. Leveraging industry 4.0 — A business model pattern framework. *International Journal of Production Economics*. 2020; 225:107588. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107588
12. Schulze F., Dallasega P. Industry 4.0 concepts and lean methods mitigating traditional losses in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: A framework. *Procedia Manufacturing*. 2020; 51:1363-1370. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.190
13. Gawer A. Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework. *Research Policy*. 2014; 43(7):1239-1249. DOI: 10.1016/j.respol.2014.03.006
14. Lapidus A.A. Scientific and technical support of survey, design, and construction as a mandatory element of attaining the required project objectives. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(11):1428-1437. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437 (rus.)
15. Gusakov A.A., Bogomolov Yu.M., Brekhan A.I., Vaganyan G.A., Vainshtein M.S., Vladimirov S.R. et al. *System engineering of construction: an encyclopedic dictionary*. Moscow, Publishing House ASV, 2004; 320. (rus.)
16. Liu D., Wang H., Lu H. Composition of construction services with hierarchical planning on

digital platform. *Automation in Construction*. 2022; 141:104449. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104449

17. Wu W., Xie L., Hao J.L. An integrated trading platform for construction and demolition waste recovery in a circular economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022; 25:100597. DOI: 10.1016/j.scp.2022.100597

18. Lapidus A.A. Formation of organizational and technological platforms in construction. *Construction Pro-*

*duction*. 2022; 1:2-6. DOI: 10.54950/26585340\_2022\_1\_2. EDN PYQGHU. (rus.).

19. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524 (rus.).

20. Kuznetsov E.S. *Management of technical systems: textbook*. Moscow, MADI (GTU), 2003; 247. (rus.).

*Received February 24, 2023.*

*Adopted in revised form on April 27, 2023.*

*Approved for publication on June 6, 2023.*

**B I O N O T E S:** **Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; LapidusAA@mgsu.ru;

**Irina S. Shevchenko** — postgraduate of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8956-4069, ResearchID: ADV-6241-2022, ORCID: 0000-0003-1046-9016; isshev@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that they have no conflicts of interest.*

## Реставрационные работы и капитальный ремонт на объектах культурного наследия: базовые аспекты оцифровки зданий при прогнозировании и планировании работ

Елена Сергеевна Зуева, Татьяна Сергеевна Мещерякова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Освещается проблематика эксплуатации объектов культурного наследия (ОКН). Представлена классификация ОКН и особенности их определения в различных странах. Проведен анализ статистических данных по ОКН в Российской Федерации, в том числе входящих в ЮНЕСКО. Рассмотрены особенности управления, проблемы мониторинга состояния ОКН. основополагающим вопросом управления ОКН является охранная деятельность, которая базируется на уникальных моделях, сформированных разными странами на основе своего уникального опыта. Предложенный подход к созданию методологии проведения капитальных работ на ОКН с использованием цифровых двойников (ЦД) зданий имеет практическую значимость, поскольку дает возможность прогнозировать эксплуатационную пригодность, сохранность во времени объектов, обеспечивая необходимую степень проработки конструктивных разделов реставрации проектов ОКН. Цель исследования — описание современного подхода к прогнозированию и планированию капитальных работ на ОКН.

**Материалы и методы.** Используются данные материалов национальной и международной нормативно-правовой базы в области градостроительной деятельности и охраны ОКН. Публичным источником статистической информации по ОКН является Единый государственный реестр ОКН. Применялись общие методы научного познания: методы эмпирического исследования (наблюдение, сравнение) и методы теоретического исследования (абстрагирование, анализ и синтез).

**Результаты.** Определены базовые аспекты диагностики ОКН в условиях цифровой среды, позволяющие сформировать отдельные положения методологии создания ЦД объектов.

**Выводы.** Проблематика проведения капитальных работ на ОКН не утрачивает своей актуальности для научных дискуссий в прикладных направлениях развития цифровых технологий строительной отрасли. Применение ЦД зданий даст возможность оптимизировать работы по проектной документации, минимизировать текущие корректировки в проектах на этапе их реализации, обеспечивая существенную экономию затрат в сравнении с современными практиками, а в конечном итоге достигнуть максимальной сохранности ОКН.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** объекты культурного наследия, стратегическое планирование, федеральные объекты, жизненный цикл здания, износ здания, реставрация, капитальные работы, цифровой двойник здания

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Зуева Е.С., Мещерякова Т.С. Реставрационные работы и капитальный ремонт на объектах культурного наследия: базовые аспекты оцифровки зданий при прогнозировании и планировании работ // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1148–1157. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1148-1157

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Сергеевна Мещерякова, meshcheryakovats@mgsu.ru.

## Restoration works and major repairs at cultural heritage sites: basic aspects of building digitization in forecasting and planning of works

Elena S. Zueva, Tatiana S. Meshcheryakova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The problematics of exploitation of objects of cultural heritage (OCH) is covered. The classification of OCH and peculiarities of their definition in different countries are presented. The statistical data on OCH in the Russian Federation, including those belonging to UNESCO, are analyzed. The peculiarities of management, problems of monitoring the state of OCH are considered. The fundamental issue of OCH management is the protection activity, which is based on unique models formed by different countries on the basis of their unique experience. The proposed approach to creating a methodology for capital works on OCH using digital twins (DT) of buildings is of practical importance, as it makes it possible to predict the serviceability and preservation in time of objects, providing the necessary degree of elaboration of structural sections of the restoration of OCH projects. The aim of the study is to describe the modern approach to forecasting and planning of capital works on OCH.

**Materials and methods.** The data of the national and international normative-legal base in the field of urban planning and protection of OCH are used. The public source of statistical information on OCH is the Unified State Register of OCH. General methods of scientific knowledge were used: methods of empirical research (observation, comparison) and methods of theoretical research (abstraction, analysis and synthesis).

**Results.** The conducted research determined the basic aspects of diagnosing OCH in a digital environment, allowing the formation of certain provisions of the methodology for creating digital twins of objects.

**Conclusions.** The issue of capital works on the OCH does not lose its relevance for scientific discussions in the applied areas of development of digital technologies in the construction industry. The use of digital twins of buildings in the selected subject area of the study will optimize the work on project documentation, minimize current adjustments to projects at the stage of its implementation, providing significant cost savings in comparison with modern practices, and ultimately achieve maximum safety of the OCH.

**KEYWORDS:** cultural heritage sites, strategic planning, federal facilities, building life cycle, building deterioration, restoration, capital works, digital twin of the building

**FOR CITATION:** Zueva E.S., Meshcheryakova T.S. Restoration works and major repairs at cultural heritage sites: basic aspects of building digitization in forecasting and planning of works. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1148-1157. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1148-1157 (rus.).

*Corresponding author:* Tatiana S. Meshcheryakova, meshcheryakovats@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к объектам культурного наследия (ОКН) относятся памятники, ансамбли и достопримечательные места, непосредственно связанные с историей общества и государства и обладающие историко-культурной ценностью<sup>1</sup>. Это в полной мере соответствует Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия, принятой в Париже 16.11.1972 на 17 сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО, ратифицированной Указом Президиума Верховного Совета СССР от 09.03.1988 № 8595-XI.

Проблематика создания методологии сохранения ОКН имеет мировое значение, которое получает развитие с учетом актуальных проблем и новых инженерно-технических возможностей. В контексте социально-экономического развития страны исходными аспектами выступают бюджетные ограничения и нормативно-правовые условия реализации комплекса работ, направленные на «...обеспечение физической сохранности и сохранение историко-культурной ценности объекта культурного наследия, предусматривающие консервацию, ремонт, реставрацию, приспособление объекта культурного наследия для современного использования и включающие в себя научно-исследовательские, изыскательские, проектные и производственные работы, научное руководство проведением работ по сохранению объекта культурного наследия, технический и авторский надзор за проведением этих работ»<sup>2</sup>.

Сегодня возникает потребность и возможность внедрения цифровых технологий (ЦТ) управления эксплуатацией ОКН, позволяющих в режиме реаль-

ного времени оценивать уровень износа объектов, своевременно обнаруживать проблемы, прогнозировать износ объектов и эффективно планировать финансирование работ на ОКН. Оцифровка ОКН дает возможность рассматривать управление его сохранностью в аспекте концепции оценки жизненного цикла объекта.

Объектом исследования выступают ОКН.

Предмет исследования, обуславливающий выделенную проблемную область, — формирование достоверного плана проведения капитальных работ на ОКН.

Цель исследования — описание современного подхода к прогнозированию и планированию капитальных работ на ОКН.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- дана характеристика проблемных областей капитальных работ на ОКН;
- проанализированы особенности комплексной диагностики ОКН;
- определены перечень и условия проведения капитальных работ на ОКН с учетом возможностей цифровых инструментов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базируется на материалах национальной и международной нормативно-правовой базы в области градостроительной деятельности и охраны ОКН, а также на актуальных научных работах в области сохранения ОКН [1–20]. Публичным источником статистической информации по ОКН является Единый государственный реестр объектов культурного наследия народов Российской Федерации (ЕГРОКН).

Ввиду того, что статья носит обзорный характер, применялись общие методы научного познания: методы эмпирического исследования (наблюдение, сравнение) и методы теоретического исследования (анализ и синтез).

<sup>1</sup> Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 14.04.2023), ст. 3.

<sup>2</sup> Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 14.04.2023), ст. 40 п. 1.

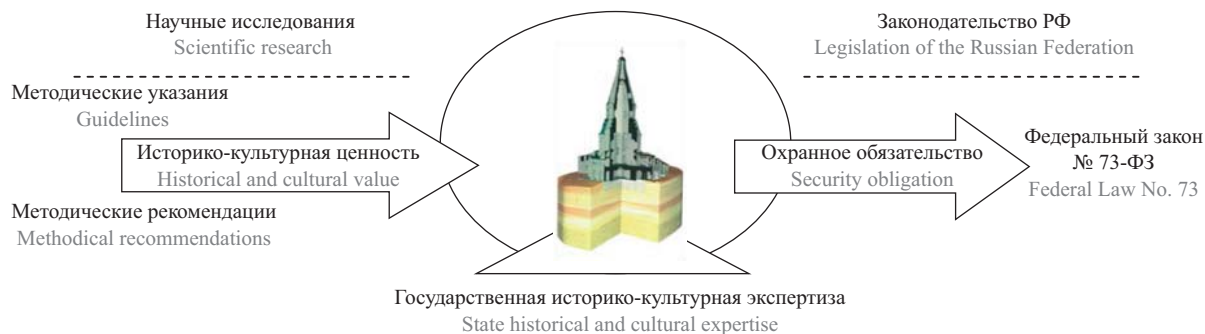


Рис. 1. Методическая основа идентификации ОКН

Fig. 1. Methodological basis for the identification of OCH

На рис. 1 представлена методическая основа идентификации ОКН.

Научные исследования в отношении ОКН выступают инструментарием, который помогает определить историко-культурную ценность объекта. Формирование подхода к созданию методологии проведения капитальных работ на ОКН с использованием цифровых двойников (ЦД) зданий является научной фундаментальной основой сохранности элементов историко-культурного наследия.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первый квартал 2023 г. в Российской Федерации, согласно сведениям ЕГРОКН, насчитывалось 444 909 ОКН, из них 210 788 — объекты федерального значения (2416 входят в перечень ЮНЕСКО), 224 291 — регионального значения (35 входят в перечень ЮНЕСКО), 9830 — муниципального (3 входит в перечень ЮНЕСКО)<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/>

В общее количество ОКН входят следующие виды объектов:

- 372 760 281 памятника;
- 65 658 ансамбля;
- 6491 достопримечательных мест.

Кроме того, существуют выявленные ОКН, но не внесенные в ЕГРОКН.

Концентрация ОКН выше в европейской части нашей страны.

Субъекты РФ имеют право самостоятельно принимать отдельные законы, регулирующие правовой режим охраны ОКН, учитывая территориальные и климатические особенности того или иного региона.

Причины утраты ОКН характеризуются рядом факторов, основные из которых отражены на рис. 2.

Приведенные факторы требуют поиска дополнительных и наиболее эффективных мер по сохранению ОКН.

Важнейшим атрибутом эффективного управления проектами любой отрасли являются ЦТ, которые в первую очередь ориентированы на обеспечение оперативной обработки большого массива информации любой конфигурации, позволяющей принять корректное решение по проблеме.

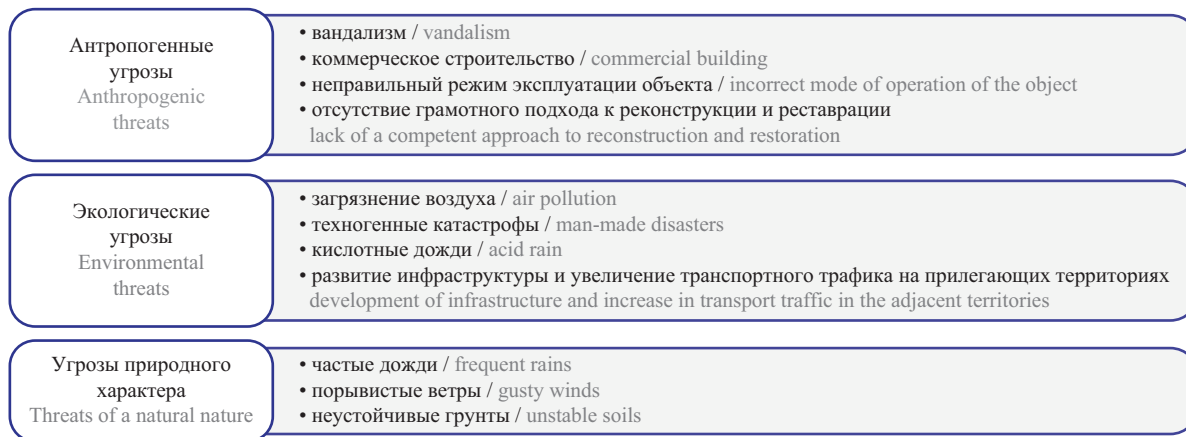


Рис. 2. Факторы, влияющие на степень разрушения ОКН

Fig. 2. Factors affecting the degree of destruction of OCH

Цифровая трансформация осуществляется и в строительной отрасли, при этом новые значения ЦТ приобретают для проведения капитальных работ на ОКН. В научных исследованиях активно рассматриваются цифровые модели ОКН, по сути, определяемые в качестве ЦД зданий. Данная тема

имеет фрагментарную реализацию на ОКН, однако до настоящего времени она не получила необходимого теоретико-методологического обоснования.

Основой построения ЦД ОКН служит комплексная диагностика объекта на основе проведения инженерно-геологических работ (рис. 3).



Рис. 3. Инженерно-геологические работы на ОКН

Fig. 3. Engineering and geological work at OCH

Создание цифровой модели ОКН определяет следующие результаты:

- выверенные/верифицированные геометрические копии объектов;
- конструктивные схемы объектов;
- физико-механические характеристики несущих элементов конструкций;
- совокупность дефектов сооружения, включая силовые дефекты;
- данные по конструктивным особенностям, прочностным характеристикам дефектов фундаментов;
- литологическое строение и физико-механические характеристики грунтового основания;
- данные по геологическим, гидрогеологическим, реологическим, карстово-суффозионным

и другим опасным явлениям в грунтовом массиве, окружающем объект;

- микробиологические и экологические данные, позволяющие определить наличие негативных процессов в материалах конструкций, помещениях, а также грунтовом массиве;
- состояние инженерных систем и сетей.

На основании собранной информации создается ЦД ОКН с исполнительной документацией после проведения реставрационных работ для дальнейшего использования в процессе эксплуатации.

Цифровой двойник ОКН — это копия существующего объекта с выявленными дефектами, прочностными характеристиками материалов конструкций и грунтов, подстилающих и окружающих ОКН.

Отдельный проблемный вопрос — построение двойника основания и фундаментов (рис. 4).

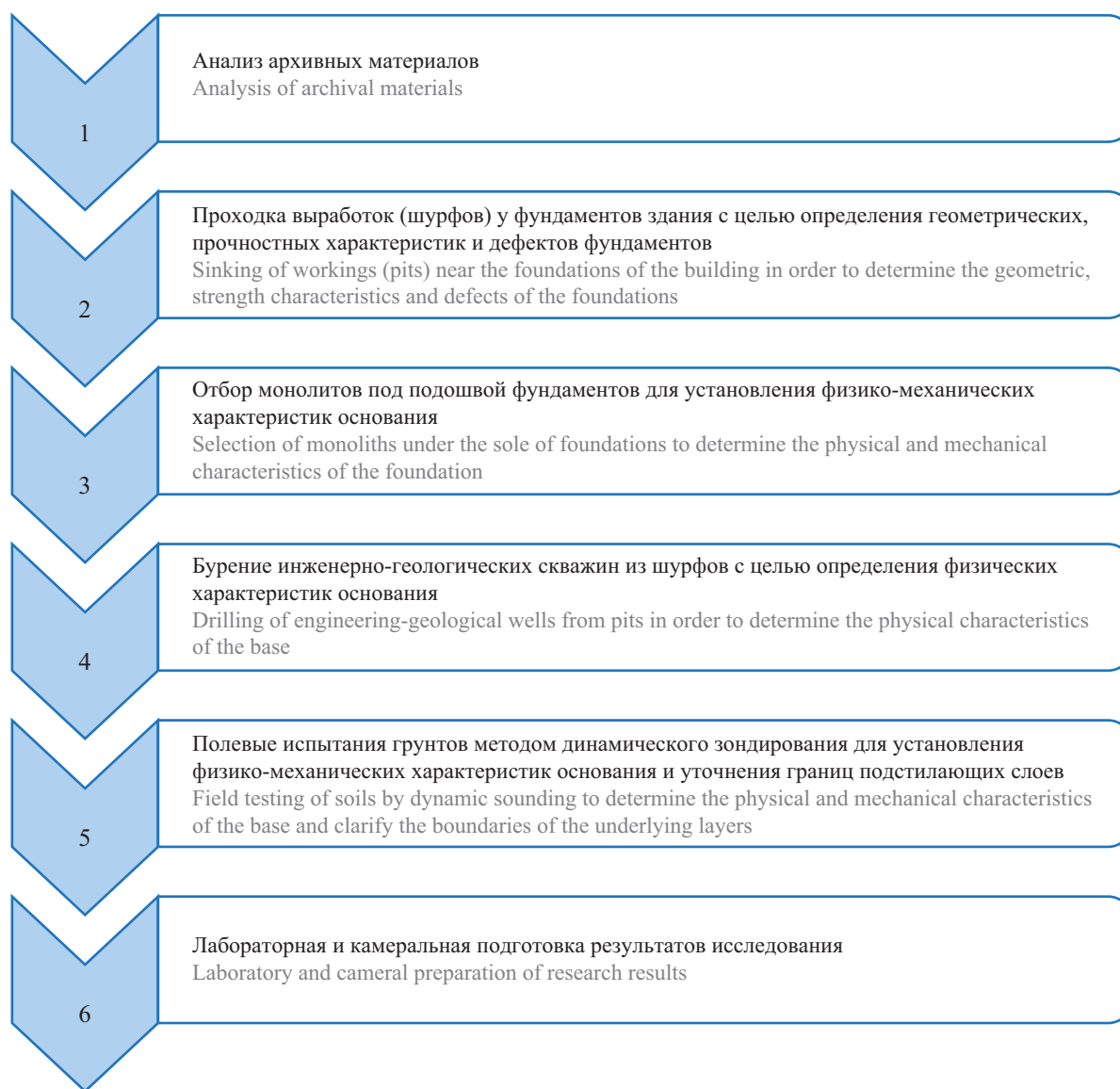


Рис. 4. Работы по построению двойника основания и фундаментов

Fig. 4. Works on the construction of a double base and foundations

По результатам выполненного анализа консолидированной информации выявляются проблемы сохранности ОКН, степень их критичности, определяющая срочность и приоритетность проведения строительных работ. По каждой из проблем осуществляются анализ причин возникновения, прогнозирование сценариев развития и возможность частичного или полного их устранения. Например, при определении процессов гниения деревянных свай ОКН зачастую констатируется их развитие на протяжении будущего периода жизненного цикла здания, предел которого может быть установлен в некотором диапазоне значений. В случае исключения или подтверждения мгновенного или кратковременного протекания процессов при существующих инженерно-геологических и гидрогеологических условиях принимается решение о превентивных или каких-либо радикальных мероприятиях (например, цементация фундаментной платформы и контакта «фундамент – грунт»). Также данная проблемная область оценивается из необходимых условий общей устойчивости здания ОКН.

Результаты исследования состояния основания и фундаментов входят в состав ЦД ОКН в виде данных:

- конфигурация, прочностные характеристики и дефекты фундаментов;
- физико-механические свойства грунтов основания и грунтов сжимаемой толщи;
- расчетные сопротивления фундаментов и грунтов основания;
- действующие напряжения под подошвой фундаментов;
- сравнение прочностных и деформационных характеристик грунтов основания и материалов фундаментов с действующими нагрузками.

Результаты инженерно-геологических исследований входят в состав ЦД ОКН в виде следующих сведений:

- инженерно-геологические разрезы с выделенными инженерно-геологическими элементами-слоями;
- физико-механические свойства грунтов сжимаемой толщи (плотность, влажность, пластичность, пористость, прочность, деформируемость);
- коэффициент постели грунта.

Опишем содержание типовой комплексной процедуры диагностики ОКН.

1. Анализ архивных материалов. При подготовке к проведению исследования производится поиск и изучение архивных материалов, относящихся к обследуемому ОКН, с целью определения:

- времени его первоначального возведения;
- конструктивного решения памятника;
- наличия и периодов проведения реконструкций, пристроек, перепланировок, усиления или замены конструктивных элементов.

При наличии сведений о выполненных ранее исследованиях осуществляется анализ развития деформаций и повреждений конструкций памятника.

2. Предварительное (визуальное) исследование выполняется путем осмотра конструкций и фиксации дефектов, включая фотофиксацию, составление чертежей с указанием размеров и положения дефектов. При визуальном исследовании также устанавливается общее конструктивное решение здания. По результатам определяется общее состояние здания и намечаются конструкции, требующие углубленного детального изучения.

Основные типы дефектов, влияющие на несущую способность памятников:

- деформационные трещины, вызванные неравномерными осадками фундаментов: в стенах — сквозные трещины, пересекающие оконные проемы или проходящие по углам продольных и поперечных стен; в сводах — преимущественно диагональные, ветвящиеся или отсекающие углы трещины;
- внутреннее расслоение кладки вследствие физико-химических процессов, протекающих в массиве увлажненной кладки, с отрывом пилястр, выходом внутренних полостей на поверхности откосов оконных и дверных проемов;
- разрывы стальных воздушных связей, соединяющих пяты сводов и арок из-за общих деформаций памятников, а также разрывы внутрстенных стальных связей;
- коррозия стальных внутренних связей в кладке стен и сводов, особенно интенсивная в местах выхода связей на поверхность кладки, разрыв кладки стен продуктами коррозии;
- повреждение кладки стен в местах интенсивного замачивания за счет вымывания раствора и размораживания кладки;
- химическая и биохимическая коррозия материалов кирпичной кладки и отделочных слоев в результате длительного замачивания;
- поражение деревянных конструкций гнилью вплоть до полной потери сечения, особенно интенсивно протекающее в опорных узлах балок на наружные стены и в местах постоянных протечек и узлах опирания стропил на наружные стены и зонах ендов;
- деформация опорных узлов и врубок, скол врубок, вызванные перегрузкой конструкций или уменьшением сечения в результате поражения гнилью.

3. Детальное (инструментальное) обследование, при котором производится:

- определение геометрических параметров основных конструктивных элементов памятника (толщины кладки стен и сводов, сечения стальных связей, расположение, сечение и шаг несущих балок и стропильных конструкций);
- установление конструктивного исполнения узловых соединений (в том числе глубина опирания балок);
- выявление составов перекрытий и покрытия; определение прочностных характеристик материалов конструкций;

- исследование состояния внутренних слоев массивных стен и перекрытий;
- материаловедческий анализ повреждений конструкционных материалов.

Все работы выполняются преимущественно с использованием неразрушающих методов контроля в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55567–2013 «Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования».

Определение геометрических параметров основных конструктивных элементов и узлов памятника, составов перекрытий и покрытий осуществляется с помощью непосредственных обмеров, в том числе в шурфах и зондажах. Установление состава и состояния конструкций в скрытых и плохо доступных полостях и глубинных слоях кладки проводится с использованием приборов типа эндоскоп, позволяющих в отверстие диаметром 10–12 мм на глубину до трех метров вводить миниатюрную видеокамеру с кабелем, передающим сигнал на монитор.

Выявление прочностных характеристик стальных и железобетонных конструкций и оценка состояния материалов каменной кладки производятся преимущественно неразрушающими методами с применением приборов (молотков Шмидта). Для построения тарировочных зависимостей выполняются лабораторные испытания ограниченного количества отобранных образцов материалов.

4. Создание цифрового двойника ОКН. Исходные данные для расчетов и построений: геометрические параметры конструкций, прочностные характеристики материалов, нагрузки на конструкции, инженерно-геологические, гидрогеологические условия и др. При этом в обязательном порядке производится учет выявленных дефектов, снижающих несущую способность конструкций. Расчеты выполняются с помощью программно-вычислительных комплексов, например MSC Nastran, позволяющих проводить расчеты как в линейной постановке, так и с учетом различных видов нелинейности (физической, геометрической, конструктивной). Расчеты осуществляются как для отдельных конструктивных элементов памятника, так и для пространственных копий, включающих все конструктивные элементы памятника, фундаменты и модель грунтового основания, выбранного по полученным реальным характеристикам. Уста-

новление несущей способности конструкций производится с учетом требований строительных норм и правил. При выполнении расчета определяется достаточность несущей способности конструкций на действующие нагрузки и предельно допускаемые нагрузки на стены, колонны, лестницы и перекрытия, а также дается прогнозный расчет на эксплуатационную надежность памятника в будущем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ввиду отсутствия открытых данных по уровню износа ОКН и информации по их выбытию из эксплуатации, основное мнение может быть сформировано на базе оценок экспертного профессионального сообщества. По различным оценкам, состояние от 50 до 70 % находящихся на государственной охране памятников истории и культуры характеризуется как неудовлетворительное, для большей их части необходимо принятие срочных мер по спасению от разрушения, повреждения и уничтожения [10–16].

Важным вопросом организационного порядка сохранения ОКН является актуализация и дополнение ЕГРОКН сведениями по состоянию ОКН, позволяющими определять исходные сведения для последующей оцифровки объектов и создания их ЦД. Формирование метаданных по характеристикам объектов возможно за счет применения технологии распределенного реестра (блокчейна) для улучшения систем и процедур долгосрочного хранения документации об ОКН и аутентификации, проверки происхождения и совместного использования цифровых объектов [17–20].

Таким образом, повышение эффективности мер по сохранению ОКН возможно за счет использования комплекса цифровых технологий. Данная тема до сих пор не нашла активного развития в РФ, несмотря на наличие необходимых отечественных программно-вычислительных комплексов и оборудования для формирования двойника здания. В ходе исследования приведен обзор основных этапов диагностики ОКН по созданию его ЦД, позволяющего своевременно реализовывать капитальные работы, снижать риск утраты ОКН, прогнозируя и планируя ремонтно-восстановительные работы на объектах.

Продолжение исследования связано с проведением экспертного опроса и формированием предварительной оценки по состоянию выделенных ОКН для дальнейшего сбора данных и формирования цифровых моделей объектов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cernaro A., Fiandaca O., Lione R., Minutoli F.* The analysis of the maintained/disowned relationship among Firmatas, Utilitas, and Venustas to preserve

the cultural heritage: an H-BIM approach for the management of historic buildings // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 1045. DOI: 10.3390/buildings13041045

2. *Rebec K.M., Deanovič B., Oostwegel L.* Old buildings need new ideas: Holistic integration of conservation-restoration process data using Heritage Building Information Modelling // *Journal of Cultural Heritage*. 2022. Vol. 55. Pp. 30–42. DOI: 10.1016/j.culher.2022.02.005
3. *Arfa F.H., Zijlstra H., Lubelli B., Quist W.* Adaptive reuse of heritage buildings: from a literature review to a model of practice // *The Historic Environment: Policy & Practice*. 2022. Vol. 13. Issue 2. Pp. 148–170. DOI: 10.1080/17567505.2022.2058551
4. *Filippov Y.Y.* Significance of historical and cultural architectural heritage of Kaliningrad region // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 291. P. 05016. DOI: 10.1051/e3sconf/202129105016
5. *Battista G., de Lieto Vollaro E., Ocloň P., de Lieto Vollaro R.* Retrofit analysis of a historical building in an architectural constrained area: A case study in Rome, Italy // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 23. P. 12305. DOI: 10.3390/app122312305
6. *Zhang Y., Dong W.* Determining minimum intervention in the preservation of heritage buildings // *International Journal of Architectural Heritage*. 2021. Vol. 15. Issue 5. Pp. 698–712. DOI: 10.1080/15583058.2019.1645237
7. *Miran F.D., Husein H.A.* Introducing a Conceptual model for assessing the present state of preservation in heritage buildings: Utilizing building adaptation as an approach // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 859. DOI: 10.3390/buildings13040859
8. *Adegoriola M.I., Yung E.H.K., Lai J.H.K., Chan E.H.W., Yevu S.K.* Understanding the influencing factors of heritage building maintenance management: findings from developed and developing regions // *Building Research & Information*. 2023. Vol. 51. Issue 5. Pp. 605–624. DOI: 10.1080/09613218.2023.2167698
9. *Kustysheva I.N., Ermakova A.M., Shirokova A.A.* current problems and methods of preserving the objects of cultural heritage in Russia // *Advances in Natural, Human-Made, and Coupled Human-Natural Systems Research*. 2023. Pp. 235–244. DOI: 10.1007/978-3-030-78083-8\_23
10. *Montusiewicz J., Barszcz M., Korga S.* Preparation of 3D models of cultural heritage objects to be recognised by touch by the blind — case studies // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 23. P. 11910. DOI: 10.3390/app122311910
11. *Giliberto F., Jackson R., Loustalot B.D., Elkadi H., Donovan K., Osman A. et al.* Cultural heritage in the context of disasters and climate change: Insights from the DCMS-AHRC cultural heritage and climate change cohort. 2022. DOI: 10.48785/100/107
12. *Щербина Е.В., Салмо А.* Градостроительные риски утраты культурного наследия // *Строительство: наука и образование*. 2022. Т. 12. № 4. С. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.4
13. *Lisienkova L., Shindina T., Lisienkova T.* Development of a methodology for assessing the technical level of cultural heritage objects in construction // *Civil Engineering Journal*. 2021. Vol. 7. Issue 4. Pp. 662–675. DOI: 10.28991/cej-2021-03091680
14. *Brůha L., Laštovička J., Palatý T., Štefanová E., Stych P.* Reconstruction of lost cultural heritage sites and landscapes: context of ancient objects in time and space // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9. Issue 10. P. 604. DOI: 10.3390/ijgi9100604
15. *Rodríguez-González P., Campo Á., Muñoz-Nieto Á., Sánchez-Aparicio L., González-Aguilera D.* Diachronic reconstruction and visualization of lost cultural heritage sites // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8. Issue 2. P. 61. DOI: 10.3390/ijgi8020061
16. *Meshcheryakova T., Zueva E.* The mechanism for managing cultural heritage objects, taking into account the possibilities of the digital environment // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 389. P. 06031. DOI: 10.1051/e3sconf/202338906031
17. *Stublić H., Bilogrivić M., Zlodi G.* Blockchain and NFTs in the cultural heritage domain: A review of current research topics // *Heritage*. 2023. Vol. 6. Issue 4. Pp. 3801–3819. DOI: 10.3390/heritage6040202
18. *Stančić H., Bralić V.* Digital archives relying on blockchain: overcoming the limitations of data immutability // *Computers*. 2021. Vol. 10. Issue 8. P. 91. DOI: 10.3390/computers10080091
19. *Duca A., Bacciu C., Marchetti A.* The use of blockchain for digital archives: a comparison between Ethereum and Hyperledger (AIUCD 2019) // *Umanistica Digitale*. 2020.
20. *Abdullaev A., Saidov A., Aliev A.* Problematic issues of providing validity and optimization of the exchange of archival information based on blockchain technology // *2021 17th International Asian School-Seminar “Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)”*. 2021. DOI: 10.1109/opcs53376.2021.9588726

Потупила в редакцию 27 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 июля 2023 г.

Одобрена для публикации 10 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Сергеевна Зуева — доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; zuevaes@mgsu.ru;

Татьяна Сергеевна Мещерякова — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; meshcheryakovats@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Зуева Е.С. — концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Мещерякова Т.С. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Cernaro A., Fiandaca O., Lione R., Minutoli F. The analysis of the maintained/disowned relationship among Firmitas, Utilitas, and Venustas to preserve the cultural heritage: An H-BIM approach for the management of historic buildings. *Buildings*. 2023; 13(4):1045. DOI: 10.3390/buildings13041045
2. Rebec K.M., Deanović B., Oostwegel L. Old buildings need new ideas: Holistic integration of conservation-restoration process data using Heritage Building Information Modelling. *Journal of Cultural Heritage*. 2022; 55:30-42. DOI: 10.1016/j.culher.2022.02.005
3. Arfa F.H., Zijlstra H., Lubelli B., Quist W. Adaptive reuse of heritage buildings: from a literature review to a model of practice. *The Historic Environment: Policy & Practice*. 2022; 13(2):148-170. DOI: 10.1080/17567505.2022.2058551
4. Filippov Y.Y. Significance of historical and cultural architectural heritage of Kaliningrad region. *E3S Web of Conferences*. 2021; 291:05016. DOI: 10.1051/e3sconf/202129105016
5. Battista G., de Lieto Vollaro E., Ocloň P., de Lieto Vollaro R. Retrofit analysis of a historical building in an architectural constrained area: a case study in Rome, Italy. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):12305. DOI: 10.3390/app122312305
6. Zhang Y., Dong W. Determining minimum intervention in the preservation of heritage buildings. *International Journal of Architectural Heritage*. 2021; 15(5):698-712. DOI: 10.1080/15583058.2019.1645237
7. Miran F.D., Husein H.A. Introducing a conceptual model for assessing the present state of preservation in heritage buildings: utilizing building adaptation as an approach. *Buildings*. 2023; 13(4):859. DOI: 10.3390/buildings13040859
8. Adegioriola M.I., Yung E.H.K., Lai J.H.K., Chan E.H.W., Yevu S.K. Understanding the influencing factors of heritage building maintenance management: findings from developed and developing regions. *Building Research & Information*. 2023; 51(5):605-624. DOI: 10.1080/09613218.2023.2167698
9. Kustysheva I.N., Ermakova A.M., Shirokova A.A. Current problems and methods of preserving the objects of cultural heritage in Russia. *Advances in Natural, Human-Made, and Coupled Human-Natural Systems Research*. 2023; 235-244. DOI: 10.1007/978-3-030-78083-8\_23
10. Montusiewicz J., Barszcz M., Korga S. Preparation of 3D models of cultural heritage objects to be recognised by touch by the blind — case studies. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):11910. DOI: 10.3390/app122311910
11. Giliberto F., Jackson R., Loustalot B.D., Elkadi H., Donovan K., Osman A. et al. *Cultural heritage in the context of disasters and climate change: Insights from the DCMS-AHRC Cultural Heritage and Climate Change Cohort*. 2022. DOI: 10.48785/100/107
12. Scherbina E.V., Salmo A. Urban planning risks of losing cultural heritage. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(4):4. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.4 (rus.).
13. Lisienkova L., Shindina T., Lisienkova T. Development of a methodology for assessing the technical level of cultural heritage objects in construction. *Civil Engineering Journal*. 2021; 7(4):662-675. DOI: 10.28991/cej-2021-03091680
14. Brůha L., Laštovička J., Palatý T., Štefanová E., Stych P. Reconstruction of lost cultural heritage sites and landscapes: context of ancient objects in time and space. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020; 9(10):604. DOI: 10.3390/ijgi9100604
15. Rodríguez-González P., Campo Á., Muñoz-Nieto Á., Sánchez-Aparicio L., González-Aguilera D. Diachronic reconstruction and visualization of lost cultural heritage sites. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019; 8(2):61. DOI: 10.3390/ijgi8020061
16. Meshcheryakova T., Zueva E. The mechanism for managing cultural heritage objects, taking into account the possibilities of the digital environment. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:06031. DOI: 10.1051/e3sconf/202338906031
17. Stublić H., Bilogrivić M., Zlodi G. Blockchain and NFTs in the cultural heritage domain: A review of current research topics. *Heritage*. 2023; 6(4):3801-3819. DOI: 10.3390/heritage6040202
18. Stančić H., Bralić V. Digital archives relying on blockchain: Overcoming the limitations of data im-

mutability. *Computers*. 2021; 10(8):91. DOI: 10.3390/computers10080091

19. Duca A., Bacciu C., Marchetti A. The use of blockchain for digital archives: A comparison between Ethereum and Hyperledger (AIUCD 2019). *Umanistica Digitale*. 2020.

20. Abdullaev A., Saidov A., Aliev A. Problematic issues of providing validity and optimization of the exchange of archival information based on blockchain technology. *2021 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)"*. 2021. DOI: 10.1109/opcs53376.2021.9588726

*Received June 27, 2023.*

*Adopted in revised form on July 10, 2023.*

*Approved for publication on July 10, 2023.*

**B I O N O T E S:** **Elena S. Zueva** — Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; zuevaes@mgsu.ru;

**Tatiana S. Meshcheryakova** — Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; meshcheryakovats@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Elena S. Zueva — research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.*

*Tatiana S. Meshcheryakova — development of methodology, revision of the text, final conclusions.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

*\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

### **Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $a$ ,  $b$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

## СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

# КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

## ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение** (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

**Материалы и методы** (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

**Результаты** (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

**Заключение** (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

## КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

**Список источников на русском языке** оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### **Образец:**

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

**Список источников на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

**Образец:**

**Reference**

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

**Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:**

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

**Образец:**

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

**Образец:**

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

**Образец:**

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf) DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

**Статья, размещенная на интернет-сайте:** Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)\*. Название [Internet]. Город, Издатель\*, Год издания [Дата последнего обновления\*; дата цитирования]. URL

**Образец:** *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

\* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс [Citethisforme.com](http://Citethisforme.com).

## ШАБЛОН СТАТЬИ

### Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

### Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>...

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна

\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

**Аннотация** (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

**Введение:** приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

**Материалы и методы:** описание применяемых информационных материалов и научных методов.

**Результаты:** развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

**Выводы:** аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

**Ключевые слова:** 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

*Благодарности* (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

*Автор, ответственный за переписку:* Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

### И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>... на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

**Abstract** (200–250 слов)

**Introduction:** text, text, text.

**Materials and methods:** text, text, text.

**Results:** text, text, text.

**Conclusions:** text, text, text.

**Key words:** text, text, text.

*Acknowledgements:* text, text, text.

*Corresponding author:* Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи – на английском языке

## ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

**Литературный обзор.** Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательнее раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

### Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

### Пример оформления:

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

### REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**Bionotes:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.**

*Вклад авторов:*

*Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).*

**Пример:**

*Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.*

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

**Пример:**

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов*

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

**ВНИМАНИЕ!**

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



**УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001**

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. x 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

**Извещение**

**Кассир**

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

**УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001**

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. x 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

**Квитанция**

**Кассир**

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

**ВНИМАНИЕ!**

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

