

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 2  
2026**

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

Сквозной номер 207

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 2  
2026**

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>	25.02.2026.
<b>Подписан в свет</b>	26.02.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,21. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 63

## 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, советник, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

### Заместители главного редактора

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

## Редакционная коллегия

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

**Петр Банашук**, 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 Дельфты, Королевство Нидерландов

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

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

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

**Забигнев Войчицкий**, 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 Емило**, 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, директор 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., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**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

**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

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

**Левон Рафаэлович Маилян**, 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., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** Алла Русланбековна Табекова

**Редактор:** Татьяна Владимировна Бердникова

**Корректор:** Оксана Валерьевна Ермихина

**Дизайн и верстка:** Алина Юрьевна Байкова

**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

**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 образования «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., проф. 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

**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>	26.02.2026

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2026

## 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

## Editorial Board

**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

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

**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 Gladyszewska-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

**Natalia G. Verstina**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, 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:** *Alla R. Tabekova*      **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

**Editor:** *Tat'yana V. Berdnikova*      **Layout:** *Alina Y. Baykova*

**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

**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

**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

*В.В. Балакин*

<b>Повышение качества воздуха жилой застройки и общественных пространств градостроительными средствами . . . . .</b>	<b>167</b>
--	------------

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

*М.Н. Кирсанов, О.В. Грибова*

<b>Формулы для двух первых частот собственных колебаний плоской фермы . . . . .</b>	<b>186</b>
---	------------

*Н.С. Никифорова, Д.Д. Пирогов*

<b>Цифровые методы прогнозирования осадок фундаментов . . . . .</b>	<b>195</b>
---	------------

*С.Г. Саиян, А.А. Марасанова, К.Д. Иванченко, К.А. Модестов*

<b>Гармонические продольные волны в дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях . . . . .</b>	<b>207</b>
--	------------

*Е.В. Попов, Д.А. Столыпин, О.В. Копров, Б.В. Лабудин, С.В. Усанов*

<b>Особенности расчета деревокомпозитных стеновых диафрагм с упругоподатливыми элементами крепления обшивки. . . . .</b>	<b>219</b>
--	------------

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*С.С. Иноземцев, Е.В. Королев*

<b>Структурные особенности асфальтобетонов при использовании капсул для самовосстановления. . . . .</b>	<b>233</b>
---	------------

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*Н.Н. Монаркин, В.А. Яковлев, Т.В. Монаркина*

<b>Численное исследование воздухораспределения в помещениях квартир при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов . . . . .</b>	<b>246</b>
---	------------

*Ю.В. Елистратова, И.В. Крюков, Д.С. Гайдаш, В.Ю. Коверина, С.С. Юрьева*

<b>Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока . . . . .</b>	<b>257</b>
--	------------

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

*Д.В. Топчий, И.В. Лавреняк*

<b>Оптимизация функций технического заказчика при вводе объектов в эксплуатацию средствами моделирования бизнес-процессов. . . . .</b>	<b>269</b>
--	------------

*М.Е. Дементьева, А.С. Малькова*

<b>Управление жизненным циклом коммунальной инфраструктуры на основе цифрового мастер-планирования. . . . .</b>	<b>280</b>
---	------------

<b>Требования к оформлению научной статьи . . . . .</b>	<b>294</b>
---	------------

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Vladimir V. Balakin*

<b>Improving air quality in residential areas and public spaces through urban planning measures. . . . .</b>	<b>167</b>
--	------------

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

*Mikhail N. Kirsanov, Olga V. Gribova*

<b>Formulas for the first two frequencies of natural oscillations of a flat truss . . . . .</b>	<b>186</b>
---	------------

*Nadezhda S. Nikiforova, Daniil D. Pirogov*

<b>Digital methods for predicting foundation settlements . . . . .</b>	<b>195</b>
--	------------

*Sergey G. Saiyan, Anastasia A. Marasanova, Ksenia D. Ivanchenko, Konstantin A. Modestov*

<b>Harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous viscoelastic rods . . . . .</b>	<b>207</b>
--	------------

*Egor V. Popov, Denis A. Stolypin, Oleg V. Koprov, Boris V. Labudin, Sergey V. Usanov*

<b>Calculation of wood composite wall diaphragms with elastic-plastic fastening elements for cladding . . . . .</b>	<b>219</b>
---	------------

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Sergey S. Inozemtcev, Evgeny V. Korolev*

<b>Structural features of asphalt concrete when using capsules for self-healing . . . . .</b>	<b>233</b>
---	------------

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Nikolay N. Monarkin, Viktor A. Iakovlev, Tat'yana V. Monarkina*

<b>Numerical study of air distribution in apartment premises using compact regenerative heat exchangers . . . . .</b>	<b>246</b>
---	------------

*Yulia V. Elistratova, Ilia V. Kryukov, Dmitrii S. Gaidash, Varvara Yu. Koverina, Svetlana S. Iureva*

<b>Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation . . . . .</b>	<b>257</b>
--	------------

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

*Dmitry V. Topchiy, Ilya V. Lavreniak*

<b>Optimization of technical customer functions when commissioning facilities using business process modelling tools . . . . .</b>	<b>269</b>
--	------------

*Marina E. Dement'eva, Anna S. Malkova*

<b>Managing the life cycle of municipal infrastructure based on digital master planning . . . . .</b>	<b>280</b>
---	------------

<b>Requirements for research paper design . . . . .</b>	<b>294</b>
---	------------

## 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 69.504:711.4:504

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.167-185

## Повышение качества воздуха жилой застройки и общественных пространств градостроительными средствами

Владимир Васильевич Балакин

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Оптимальный аэрационный режим и гигиенические нормативы содержания выбросов автомобилей в воздухе жилых зон городов обеспечиваются путем выбора рациональных решений по направлению трассы, планировке, застройке и озеленению транспортных коммуникаций. Цель исследования — изучение закономерностей рассеяния отработавших газов автомобильного транспорта на городских улицах с разработкой градостроительных мероприятий по повышению качества воздуха и обеспечению комфортного аэрационного режима в пешеходных зонах и общественных пространствах.

**Материалы и методы.** Проведены отбор и химический анализ проб воздуха на содержание токсичных ингредиентов и анемометрические съемки на магистральных дорогах и улицах крупного города, моделирование процесса рассеяния выбросов автомобильного транспорта полосами озеленения на экспериментальном полигоне.

**Результаты.** Установлено влияние приемов планировки и застройки на аэрационный режим и качество атмосферного воздуха городских улиц. Определена газозащитная эффективность полос зеленых насаждений разной конструкции. Предложены формулы для расчета снижения концентрации оксида углерода полосами озеленения в зонах пешеходного движения на городских дорогах и улицах.

**Выводы.** На участках городских дорог, не связанных с застройкой, наиболее эффективными по газозащитным свойствам являются полосы озеленения плотной конструкции. На застроенных участках городских дорог и улиц максимальное снижение концентрации ингредиентов в тротуарной части наблюдается при высоте полос зеленых насаждений на уровне средних этажей зданий. При плотной застройке городских улиц наиболее высокое качество воздуха в пешеходных зонах и общественных пространствах обеспечивают полосы древесных растений с высоким штамбом и открытым подкroновым пространством. В городах с низкими среднегодовыми скоростями ветра для снижения загазованности уличные пространства раскрываются с наветренной стороны путем использования приемов торцевой, точечной и свободной застройки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** улицы, пешеходные зоны, общественные пространства, зеленые насаждения, выбросы автомобилей, рассеяние

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Балакин В.В. Повышение качества воздуха жилой застройки и общественных пространств градостроительными средствами // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 167–185. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.167-185

*Автор, ответственный за переписку:* Владимир Васильевич Балакин, balakin-iais@yandex.ru.

## Improving air quality in residential areas and public spaces through urban planning measures

Vladimir V. Balakin

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The optimal aeration regime and hygienic standards for the content of car emissions in the air of residential areas of cities are ensured by choosing rational solutions for the direction of the highway, planning, building and landscaping of transport communications. The purpose of this study is to investigate the patterns of exhaust gas dispersion by road transport on urban streets, with the development of urban planning measures to improve air quality and ensure a comfortable aeration regime in pedestrian zones and public spaces.

**Materials and methods.** Selection and chemical analysis of air specimens for toxic ingredients and anemometric surveys on highways and streets in a large city, modelling the process of dispersion of automobile emissions by green belts in an experimental site.

**Results.** The influence of planning and building techniques on the aeration regime and atmospheric air quality of urban streets was established. The gas-protective efficiency of green plantation strips of different designs has been determined.

Formulas were proposed for calculating the reduction of carbon monoxide concentration by green plantation strips in pedestrian areas on urban roads and streets.

**Conclusions.** In areas of urban roads that are not connected to buildings, the most effective way to protect against gas emissions is to use dense planting strips. In built-up areas of city roads and streets, the maximum decrease in the concentration of ingredients in the pavement is observed when the height of the green belts is at the level of the middle floors of buildings. In areas of urban streets that are densely built up, the highest quality of air in pedestrian areas and public spaces is achieved by using planting strips with tall trunks and open undergrowth. In cities with low average annual wind speeds, street spaces are opened up on the windward side to reduce air pollution by using techniques such as end, point, and free-form construction.

**KEYWORDS:** streets, pedestrian zones, public spaces, green spaces, car emissions, scattering

**FOR CITATION:** Balakin V.V. Improving air quality in residential areas and public spaces through urban planning measures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):167-185. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.167-185 (rus.).

*Corresponding author:* Vladimir V. Balakin, balakin-iaais@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие городов и повышение качества жизни населения базируются на новых подходах к проектированию элементов планировочной структуры и благоустройству жилых территорий. Одним из приоритетных направлений создания комфортной городской среды является организация общественных пространств и пешеходных зон. Вместе с тем при интенсивном освоении городских территорий под застройку происходит сокращение количества участков, обозначенных в проектах благоустройства и формирования общественных пространств, а попытки их замены дворами приводят к отсутствию разнообразия и минимизации функций, ограничению пешеходных маршрутов между ними и, как следствие, «неудовлетворенности разных групп населения» [1]. Поэтому в условиях дефицита свободных городских территорий общественные пространства образуются преимущественно в парках, скверах, на набережных, улицах и площадях.

Исходя из этого, современный подход к проектированию и реконструкции городских улиц заключается, кроме расширения спектра их транзитных функций и формирования транспортно-коммуникационного каркаса города, в развитии пространственной структуры его территории с созданием системы пешеходных зон и общественных пространств [2, 3]. Такая качественная внутригородская трансформация направлена на повышение комфорта городской среды, при этом городские улицы, образуя структурно-планировочный каркас города, встраиваются в его градостроительный портрет через систему пешеходного движения вместе с функционально и эстетически качественным объектным наполнением общественных пространств [4, 5].

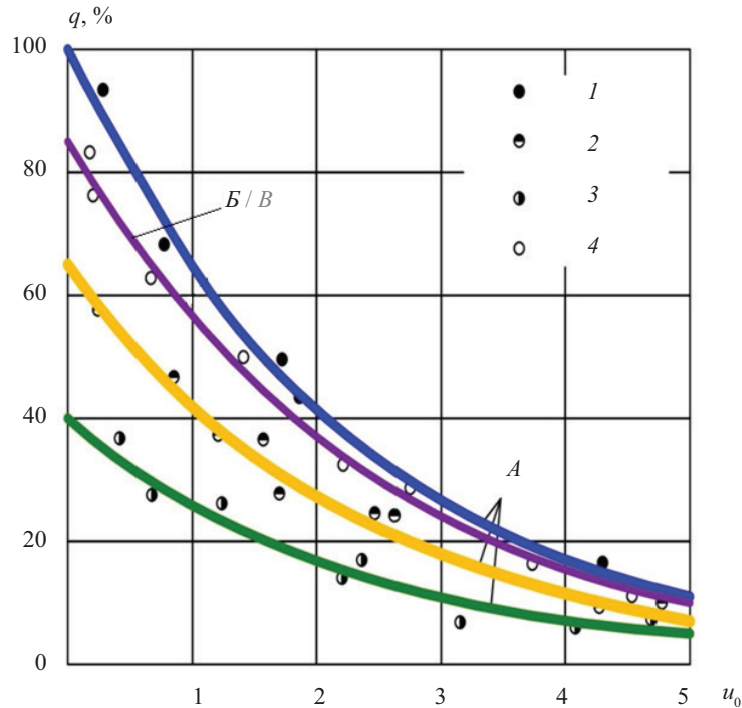
В спектре функций городских улиц, вместе с экономическими и социальными, важную позицию занимает экологическая функция [2, 4]. Экономическая функция состоит главным образом в рациональном использовании территории, а социальная — в наполнении общественных пространств необходимыми объектами социального обслуживания. В экологическом аспекте на городских улицах, благоустраива-

емых для жителей и гостей города, обеспечивается снижение влияния всех возможных негативных воздействий на городскую среду с добавлением природных элементов для поддержания ее комфортного состояния [2]. При этом неотъемлемым элементом общественных пространств остаются зеленые насаждения.

По интенсивности использования жителями и гостями города объектов, наполняющих общественные пространства, — коммерческих предприятий, элементов пешеходной инфраструктуры, рекреаций и других, городские улицы разделяются на активные с продолжительностью нахождения посетителей более 10 мин, умеренно активные — от 2 до 10 мин и неактивные с транзитным движением пешеходов [4]. Активные улицы формируют уникальное общественное пространство, привлекающее жителей и гостей города благодаря своим эстетическим, культурным и архитектурным качествам [5]. В соответствии с экологическим дискомфортом, связанным с функционированием транспортной системы города, на активных улицах требуется защита их посетителей от вредных и беспокоящих факторов. Особое внимание уделяется улицам районного и местного значения, пешеходным улицам и площадям с наибольшим количеством пользователей пешеходных зон и общественных пространств<sup>1</sup>. Наиболее актуальной задачей проектирования данных объектов является «снижение уровня шума и загрязнения воздуха отработавшими газами»<sup>2</sup> (ОГ) автомобилей и создание комфортной городской среды. Опросы населения показывают, что в крупных городах транспортный шум и загрязнение атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта выступают в качестве главных экологических факторов, имеющих однонаправленное и взаимосодействующее воздействие [6].

<sup>1</sup> СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89\*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209?ysclid=m32ysnfh1759407928>

<sup>2</sup> Рекомендации по модернизации транспортной системы городов. МДС 30-2.2008 / ЦНИИП градостроительства РААСН. М. : ОАО «ЦПП», 2008. 70 с.



**Рис. 1.** Зависимость начальной концентрации CO в воздухе  $q$  от скорости ветра  $u_0$  над краем проезжей части на высоте 1,5 м на городских улицах: 1, 4 — магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения; 2 — магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения; 3 — магистральные улицы районного значения; А — летом; В — зимой

**Fig. 1.** Dependence of initial concentration of CO in the air  $q$  on wind speed  $u_0$  above the edge of the carriageway at a height of 1.5 m on city streets: 1, 4 — main streets of city-wide importance for continuous traffic; 2 — main streets of city-wide importance with regulated traffic; 3 — the same, district-wide traffic; А — in summer; В — in winter

В результате натурных наблюдений в крупных городах (Астрахань, Краснодар, Кишинев) установлено, что на формирование концентрации загрязняющих веществ в воздухе городских улиц, кроме параметров транспортного потока, высоты зданий и ширины улицы по линиям застройки, существенное влияние оказывает скорость ветра [7]. Теснота этой зависимости по оксиду углерода — ведущему компоненту ОГ оценивается коэффициентом корреляции  $r$  в пределах 0,70–0,78 (рис. 1), что соизмеримо с влиянием интенсивности движения автомобильного транспорта ( $r = 0,85–0,90$ ).

По характеру кривых на рис. 1 видно, что в интервале скоростей ветра 3–5 м/с уровни загрязнения воздуха оксидом углерода CO на магистральных улицах различных категорий сводятся до минимума. Очевидно, ветер, достигая таких скоростей и более, увеличивает воздухообмен на улицах, осуществляемый через разрывы в застройке, снижает и нивелирует уровень загрязнения воздуха на улично-дорожной сети (УДС) в целом, выступая в роли фактора, сдерживающего процесс формирования высоких концентраций ОГ в воздушном бассейне города.

Максимальные разовые предельно допустимые концентрации таких ведущих компонентов ОГ автомобилей, как CO, диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) и углеводороды ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) в воздухе соблюдаются при ветровом

режиме в пределах 3–4 м/с на 40–70 % общей протяженности магистральных улиц в городе [8]. Такие скорости ветра обеспечивают комфортные и субкомфортные типы погод по теплоощущениям человека при пребывании на открытом воздухе, определяемые сочетаниями скорости ветра, температуры и влажности воздуха [9]. Это дает возможность использовать территории для селитебных и рекреационных целей в климатических районах с широким диапазоном колебания климатообразующих факторов<sup>3</sup>. При этом постановка задач по формированию благоприятного микроклимата и обеспечению высокого качества атмосферного воздуха на городских дорогах и улицах градостроительными средствами существенно дифференцируется как в теплый, так и холодный период года.

В климатических областях с низкой средней скоростью ветра (до 3 м/с) и преобладанием штилевых условий погоды — таежной ландшафтной подзоне, широколиственных лесах, оазисах и других в теплый период года не обеспечивается достаточно комфорт-

<sup>3</sup> Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию размещения и развития производительных сил на территориях нового освоения и в промышленно развитых регионах. М. : НИИ общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Сысина, 1983. 94 с.

ное проветривание жилых образований [10, 11]. Здесь у жителей поселений при сочетании высокой температуры воздуха с повышенной влажностью и низкой скоростью ветра возникают ощущения дискомфорта, появляется опасность теплового удара. Вместе с этим в летние месяцы подвергается перегреву внутренняя среда зданий [12]. Одновременно на магистральных улицах и в жилой застройке отмечается повышенный уровень загрязнения атмосферы выбросами автомобильного транспорта. Поэтому для создания комфортной городской среды и снижения загазованности городских улиц необходимо максимальное сохранение исходной скорости ветра. Это достигается путем направления трассы транспортных коммуникаций вдоль преобладающих ветров по повторяемости и приемами планировки, застройки и озеленения жилых образований и общественных пространств, стимулирующими их эффективное проветривание и обеспечивающими комфортные тепловые ощущения жителей [13].

В таких условиях наиболее рациональной ориентацией магистральных улиц в продольном направлении следует считать широтную, обеспечивающую усиление скорости ветра и более интенсивное рассеяние выбросов автомобильного транспорта. На данных улицах в дополуденное время ближе к 11 ч концентрация  $CO$  в воздухе резко снижается до локального минимума из-за усиления конвективного воздухообмена. Поскольку поверхность асфальта нагревается на  $7-9\text{ }^{\circ}C$  больше, чем газон, и на  $12-14\text{ }^{\circ}C$  больше, чем листва деревьев [14], в уличном пространстве из-за появления температурных контрастов происходит замещение вертикальных восходящих потоков воздуха над прогретым прямыми солнечными лучами дорожным покрытием нисходящими токами воздуха, появляющимися из-за очагов прохлады в кронах древесных растений с более низкой температурой воздуха. В результате отмечается быстрое самоочищение воздушного бассейна улицы. Достигнув максимума в 10 ч вследствие увеличения интенсивности движения, концентрация  $CO$  в воздухе резко снижается до локального минимума в суточном цикле [15].

На улицах меридианальной ориентации продольной осью при отсутствии циркуляции крупного масштаба подвижность воздуха с 7 до 10 ч незначительна и обусловлена в основном турбулизацией воздушных масс транспортными потоками. Вертикальный градиент температуры имеет минимальное значение, так как проходу солнечных лучей к земной поверхности препятствуют вершины деревьев и застройка. Поэтому в утренние часы на таких улицах отсутствуют температурные контрасты и вертикальный конвективный воздухообмен, а рассеяние примесей сдерживается из-за малой скорости ветра и инверсионного запирающего слоя воздуха, образуемого над крышами зданий [15]. При ослаблении интенсивности вертикального перемешивания

воздуха во время инверсии приземные концентрации  $OG$  могут быть выше предельно допустимых по большинству компонентов и сохраняться в течение длительного периода над межмагистральными территориями. Поэтому на улицах, ориентированных по меридиану, для более эффективного прогрева земной поверхности в дополуденные часы и очищения воздушного бассейна применяются приемы свободной планировки застройки с переменной этажностью зданий, смещением их в рядах и достаточным отступом от проезжей части.

В теплое время года оптимальный аэрационный режим в жилой застройке и общественных пространствах поддерживается использованием влияния рельефа и акваторий на микроклимат с образованием горно-долинной и бризовой циркуляции воздушных масс разной периодичности направления и скорости в городах с соответствующими особенностями топографии и часто повторяющейся штилевой погодой [16]. В Волгограде, отличающемся выраженной линейно-групповой архитектурно-планировочной структурой, летом особое значение имеет сохранение аэрационного потенциала и мелиоративного влияния р. Волги на микроклимат набережной рекреационной зоны и прилегающей опорной застройки. Этому способствуют балочные комплексы, долины, овражные поймы рек Царицы, Ельшанки и Мокрой Мечётки вместе с широкими лестничными стоками между верхней и нижней террасами набережной. Благодаря этому потоки чистого воздуха восходят на прибрежную часть города и проникают внутрь планировочных районов по коридорам, формируемым на склоне, а затем — по поперечным улицам (Порт-Саида, Комсомольская, Аллея Героев, Ленина, Огарёва, Баррикадная, Иркутская и др.) и через разрывы в периметральной застройке прибрежных кварталов.

В городах с наиболее распространенной компактно-прямоугольной планировкой УДС и достаточно выраженной асимметрией розы ветров по повторяемости такое мероприятие, как выбор направления трассы основных транспортно-коммуникационных коридоров, близкого к господствующим направлениям ветра, позволяющее сохранить и даже увеличить скорость воздушных потоков в уличном пространстве, реализуется примерно в 50 % случаев. Например, в г. Краснодаре при характерной для него розе ветров по повторяемости наиболее рациональной с точки зрения чистоты воздушного бассейна следует считать ориентацию магистральных улиц продольной осью по сектору  $\alpha$ , равному  $125^{\circ}$  и находящемуся в пределах  $10-135^{\circ}$  от северного направления (табл. 1). В данном секторе находятся улицы Северная, К. Либкнехта, Филатова, Гагарина, Атарбекова и др. Сектор менее благоприятной ориентации магистральных улиц  $\beta$  составляет  $55^{\circ}$  ( $315-10^{\circ}$  от северного направления). В этот сектор входят улицы Красная, Октябрьская, Красноармейская, Седина, Дзержинского и др.

Табл. 1. Характеристика улично-дорожной сети г. Краснодара по ориентации магистральных улиц

Table 1. Characteristics of the street network in Krasnodar by the orientation of the main streets

Протяженность магистральных улиц различных категорий широтной ( $\alpha$ ) и меридианальной ( $\beta$ ) ориентации в зоне жилой застройки, км/%				
Length of main streets of various categories of latitudinal ( $\alpha$ ) and meridional ( $\beta$ ) orientation in the residential area, km/%				
Общегородского значения Citywide significance		Районного значения Of regional importance		Всего Total
Широтная $\alpha$ Latitudinal $\alpha$	Меридианальная $\beta$ Meridional $\beta$	Широтная $\alpha$ Latitudinal $\alpha$	Меридианальная $\beta$ Meridional $\beta$	
78,3/28	57,7/21	68,5/25	71,0/26	275,5/100

В соответствии с установленной по натурным наблюдениям зависимостью, показанной на рис. 1, при сохранении характерных скоростей ветра в пределах 2,4–3,6 м/с в теплый период года при максимальной нагрузке УДС автомобильным транспортом в г. Краснодаре обеспечивается снижение концентраций СО в воздухе магистральных улиц на 65–85 %.

Сохранение и увеличение исходной скорости воздушных потоков на магистральных дорогах и улицах, связанных с жилой застройкой и ориентированных по перпендикуляру к преобладающему направлению ветра, обеспечивается расположением многосекционных зданий с отступом от красной линии, чередованием их этажности и изменением конфигурации в плане. Также возможно формирование жилых групп, открытых к румбам с низкой средней скоростью ветра, расположение линейных короткокорпусных зданий с наветренной стороны под острым углом (не более 45°) к преобладающему направлению ветра. Для стимулирования аэрации магистральных улиц широко применяются приемы свободной планировки застройки с включением в развертку легко обтекаемых зданий башенного типа<sup>4</sup>. При таких композиционных приемах планировки и застройки на проезжую часть попадает минимум ветровой тени зданий, а коэффициент трансформации ветра по скорости находится в оптимальных пределах — от 0,6 до 0,95 [16].

Однако следует учитывать, что при противоположном направлении ветра внутриквартальная территория остается открытой для распространения атмосферных загрязнений и транспортного шума. При открытом дворе пространстве концентрации фотооксидантов и диоксида азота NO<sub>2</sub> в воздухе на расстоянии до 50–100 м от проезжей части магистрали достигают 60 % от начального уровня [17]. Поэтому для снижения загрязнения воздуха и уровня шума в жилых образованиях разрывы между зданиями заполняются вставками в виде лоджий и балконов, малоэтажными объектами первичного обслуживания культурно-бытового и торгового назначения с временным пребыванием людей, групповыми структурами древесно-кустарниковых насаждений, акустическими экранами и другими экранирующими устройствами.

<sup>4</sup> Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. М. : Стройиздат, 1986. 59 с.

Таким образом, при активном сочетании ориентации магистральных улиц продольной осью по направлению преобладающих ветров с оптимальными вариантами их планировки, застройки и озеленения достигается сохранение в уличном пространстве исходных скоростей ветра, обеспечивающих комфортный аэрационный режим и максимальное снижение загазованности.

В климатических областях со среднегодовыми скоростями ветра 5–10 м/с и более сильными ветрами (степи, лесостепи, полупустыни и др.) требуется защита жилых территорий от ветра. В холодный период года у жителей поселений может возникнуть напряжение терморегуляции, развиваться холодовой стресс и появляться опасность обморожения открытых участков кожи [18]. Поэтому здесь на стадии проектирования генерального плана учитываются ветрозащитные особенности неровностей рельефа и крупных зеленых массивов. При детальном проектировании жилых образований формируются замкнутые и полужамкнутые относительно преобладающих направлений ветра группы жилых зданий и объектов обслуживания в сочетании с многорядными полосами озеленения в целях защиты от сильного холодного ветра объектов, особенно чувствительных к переохлаждению — детских образовательных организаций, лечебно-оздоровительных учреждений и др. [19]. В Волгограде в зимний период особенно неблагоприятными являются сильные ветры восточного и северо-восточного направлений. В таких условиях необходимы ограничения по использованию общественных пространств в рекреационных целях и для пешеходных коммуникаций.

Вместе с внедрением архитектурно-планировочных средств регулирования аэрационного режима, снижения загазованности и транспортного шума на территории жилой застройки, в пешеходных зонах и общественных пространствах в пределах городских поселений развивается ландшафтно-средозащитное озеленение [20–24]. Древесно-кустарниковые насаждения снижают скорость холодных ветровых потоков зимой и температуру воздуха в жилых и рекреационных зонах летом, защищают здания от излишней инсоляции и осадения пыли, изолируют застройку от транспортного шума [25–32]. В среднем кроны деревьев поглощают 25 % звуковой энергии и примерно 75 % этой энергии отражают и рассеивают [33]. Оздоровительные функции зеленых насаждений проявля-

ются также при поглощении углекислоты, хлоридов и фторидов, выделении кислорода [34].

На примере обследований методом системного анализа более 90 участков улиц Москвы выделены факторы, влияющие на развитие общественных пространств [5]. На улицах, активно используемых жителями и гостями города благодаря своему расположению — Большой Дмитровке, Ильинке и Малой Дмитровке, выявлены высокие уровни шума и загрязнения воздуха. В ряду проблем, обозначенных в результате анализа общественных пространств Москвы и других российских городов, выделяется экологический дискомфорт, связанный с сокращением площади зеленых зон. В результате данного исследования разработаны концептуальные предложения в части дополнительного озеленения городских улиц для формирования комфортной городской среды и достижения физиологического ощущения комфорта пользователями общественных пространств. Для практической реализации этих рекомендаций требуется детальная научная и проектная проработка планировочных и конструктивных решений объектов озеленения, включаемых в уличное пространство, с учетом их влияния на аэрационный режим и качество атмосферного воздуха.

При оптимальных конструктивных и планировочных параметрах объекты озеленения совместно с травяной растительностью способны снизить уровень загрязнения воздуха жилых образований путем рассеяния, поглощения, детоксикации и транслокации ингредиентов с удалением в почву [33]. Поэтому на объектах транспортной инфраструктуры и прилегающих территориях, подверженных негативному воздействию транспортных потоков, возникает необходимость сохранения и увеличения площади зеленых насаждений с их «рациональной пространственной организацией» [17]. К настоящему времени недостаточно изученными остаются вопросы размещения объектов озеленения средозащитного назначения в пределах поперечного профиля улиц. Данная научная задача обозначена в работах Ф.Л. Серебров-

ского [18], А.В. Городкова [20], О.В. Чернышенко [33], Т.В. Ивченко, Р.А. Романовой и Е.Ю. Коротковой [35], Н.В. Данилиной, И.Д. Тепловой, П.В. Тряпкина, Т.М. Смирновой [36] и др.

В типологическом ряду объектов озеленения, выделенном А.В. Городковым [37], детального изучения требует средозащитная роль линейно-полосных структур зеленых насаждений, формируемых на городских дорогах и улицах, поскольку сложившиеся в проектной практике принципы их проектирования не в полной мере обеспечивают экологическое благополучие в наиболее уязвимых зонах пешеходного движения и общественных пространствах. В связи с этим возникает актуальная научная задача определения рациональной планировочной позиции, оптимальных геометрических параметров и породного состава полос зеленых насаждений на городских улицах с учетом трансформации ветра и рассеяния выбросов автомобилей.

Из вышеизложенного следует, что зеленые насаждения вносят существенный вклад в снижение негативного воздействия транспортного комплекса на городскую среду. Однако вопросы рационального размещения объектов озеленения средозащитного назначения относительно источников загрязнения атмосферного воздуха и объектов защиты — жилых зданий, пешеходных зон и общественных пространств на городских улицах остаются недостаточно изученными. Также остается неясным, как влияют высота, плотность и другие конструктивные особенности полос зеленых насаждений на формирование аэрационного режима и уровень загазованности улиц и прилегающей застройки. Это особенно актуально при организации на городских улицах общественных пространств с большой продолжительностью нахождения посетителей.

Объектом исследования является качество атмосферного воздуха городских улиц, определяемое концентрацией токсичных веществ, формируемой в результате влияния параметров транспортных потоков, аэрационного режима, фонового загрязнения



Рис. 2. Факторы, формирующие уровень загрязнения воздуха на городских улицах

Fig. 2. Factors that determine the level of air pollution on city streets

от стационарных источников, а также градостроительных факторов, среди которых в качестве предметов исследования выделяются застройка улиц и объекты их озеленения (рис. 2).

Цель исследования — изучение закономерностей формирования аэрационного режима и рассеяния выбросов автомобильного транспорта на поперечном сечении городских улиц под воздействием полос зеленых насаждений разной конструкции с выявлением эффектов снижения концентрации ингредиентов в воздухе пешеходных зон и общественных пространств путем выбора оптимальных приемов планировки, застройки и озеленения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение газозащитных функций зеленых насаждений проведено в натурных условиях на улицах г. Астрахани и полигоне крупномасштабного моделирования. Наблюдениями охвачены все периоды года. Для натурных обследований выбрано 54 участка магистральных улиц общегородского и районного значения, в том числе в Ленинском районе — 11, Кировском — 14, Советском — 13 и Труссовском — 16. Объекты исследования отличаются между собой размерами и составом транспортных потоков, характером планировки и этажностью застройки. На улицах Бабаевского, Славянской, Латвийской, Краснопитерской, Бакинской, Коммунистической, Адмирала Нахимова и Коптеева застройка представлена в основном одноэтажными зданиями индивидуального пользования. На улицах Трусова, Ленина, Шаумяна, Магнитогорской, Адмирала Нахимова, Бэра, Б. Хмельницкого, Псковской, Аристовой и К. Маркса застройка двух-, четырехэтажная. Улицы Савушкина, Яблочкова, Тульская, Рождественского, Звездная, Магистральная и Заводская имеют пятиэтажную застройку. Натурные наблюдения проведены также на улицах с девятиэтажной застройкой (Победы, Воробьева, Кубанская).

Обследования улиц выполнялись в утренние и вечерние часы (8.00–11.00, 16.00–18.00), соответствующие часам пик движения автомобильного транспорта. Эти периоды характеризуются незначительными колебаниями скорости и направления ветра и минимальной разницей температуры воздуха у поверхности земли и на высоте 1,5 м, что соответствует близкому к безразличному состоянию устойчивости приземного слоя атмосферы. Для изучения закономерностей горизонтального распределения ОГ на поперечном сечении дорог и улиц в качестве модельных компонентов избраны оксиды азота  $\text{NO} + \text{NO}_2$  и оксид углерода  $\text{CO}$  как наиболее токсичные газы, содержащиеся в наибольшем количестве в выбросах автомобилей.

Пробы воздуха отбирались на высоте 1,5 м, соответствующей уровню дыхания пешеходов<sup>5</sup>, у под-

ветренного края проезжей части, на разделительных полосах, пешеходных тротуарах и у фасадов зданий (рис. 3). Газовоздушная смесь протягивалась аспираторами ЭА-30, работающими от аккумуляторной батареи, к пробоотборным колбам и сосудам с поглотительной жидкостью по полихлорвиниловым трубкам, закрепленным у пунктов отбора проб на металлических стойках. Угол между направлением ветра и осью улицы во время эксперимента был близок к  $90^\circ$ . Одновременно фиксировалось снижение концентрации ингредиентов по поперечному сечению улиц на открытой территории. Синхронно с отбором проб воздуха регистрировались метеорологические факторы и учитывались параметры транспортных потоков. Для определения скорости ветра в пунктах наблюдений использованы чашечные анемометры МС-13. Направление ветра фиксировалось по анеморумбометру, установленному на отдельном штативе. Температурный градиент определялся в пределах высот 0,2 и 1,5 м по аспираторному психрометру МВ-4М. Показания данного прибора по сухому и смоченному термометрам служили для выявления относительной влажности воздуха по психрометрическим таблицам.

В соответствии с методикой подсчета интенсивности движения, средняя продолжительность наблюдений составляла 20–30 мин. Отбор одной пробы воздуха для определения концентрации оксида углерода длился 5 мин, анемометры включались также на 5 мин, а воздух протягивался аспираторами через раствор KI для поглощения оксидов азота в течение всего времени регистрации проходящих автомобилей.

Необходимое число отбираемых проб воздуха и повторных измерений микроклиматических факторов  $n_1$  в каждом пункте наблюдений установлено в результате статистической обработки пробных замеров, выполненных на четырех магистральных улицах, по формуле:

$$n_1 = n(p/p_1)^2, \quad (1)$$

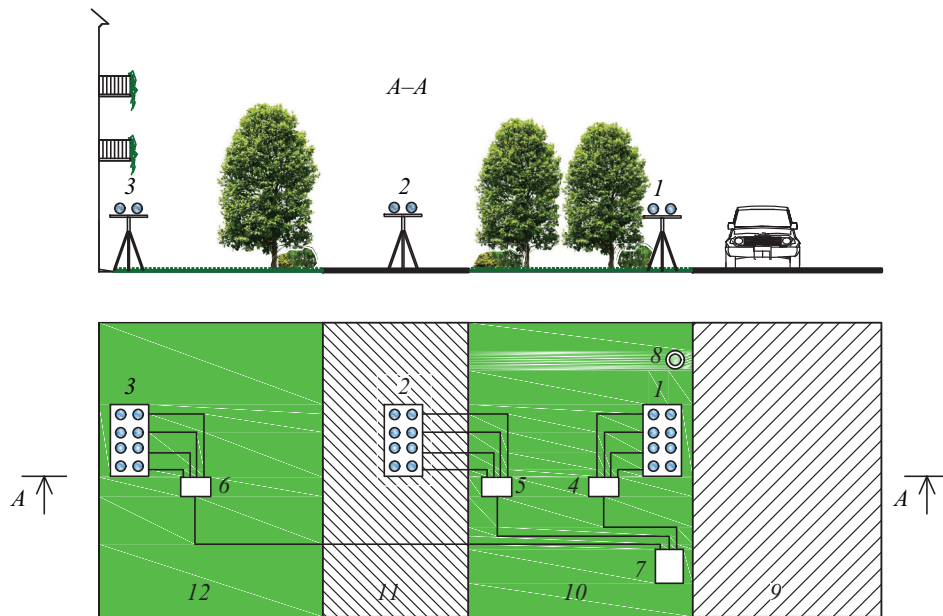
где  $n$  и  $p$  — число пробных замеров и их точность, %;  $p_1$  — желаемая точность опыта (5 %).

В результате были получены следующие значения  $n_1$ : для концентраций  $\text{CO}$  и  $\text{NO} + \text{NO}_2$  соответственно 16 и 4, скорости ветра — 7, температуры воздуха — 1.

Исходя из требуемой повторности и продолжительности наибольшего цикла измерений, условие синхронности наблюдений выполнялось при одновременном отборе на каждом сечении четырех проб воздуха на содержание  $\text{CO}$ , использовании четырех пар поглотителей  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  и двух анемометров. Для измерения температуры и определения относительной влажности воздуха в исследуемых пунктах было достаточно одного психрометра.

Концентрацию  $\text{NO} + \text{NO}_2$  в воздухе выявляли отдельным методом, предложенным А.Е. Перегуд и Е.В. Гернет [38]. В основе метода принято окис-

<sup>5</sup> ГОСТ 17.2.3.01–86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. М.: Стандартинформ, 2005.



**Рис. 3.** Организация натурных наблюдений на магистральной улице: 1–3 — пункты отбора проб воздуха на содержание CO и NO + NO<sub>2</sub>; 4–6 — электроаспираторы ЭА-30; 7 — электроаккумулятор; 8 — учетчик, ведущий регистрацию параметров транспортного потока; 9 — проезжая часть; 10 — разделительная полоса между проезжей частью и тротуаром; 11 — тротуар; 12 — разделительная полоса между тротуаром и застройкой

**Fig. 3.** Organization of field observations on the main street: 1–3 — air sampling points for CO and NO + NO<sub>2</sub>; 4–6 — EA-30 electric aspirators; 7 — electric accumulator; 8 — meter recording traffic flow parameters; 9 — carriageway; 10 — dividing strip between the carriageway and the sidewalk; 11 — sidewalk; 12 — dividing strip between sidewalk and building

ление монооксида азота NO до диоксида азота NO<sub>2</sub> с последующим его поглощением раствором KI при протяжке смеси газов с воздухом аспирационными установками со скоростью 0,1 л/мин из пунктов отбора проб через поглотительные сосуды. Концентрацию оксидов азота в пробах воздуха определяли через оптическую плотность раствора KI на фотоэлектроколориметре ФЭК-56.

Коэффициент ажурности уличных полос озеленения, характеризующий их плотность, устанавливали по формуле:

$$K_{\text{аж}} = F/F_0, \quad (2)$$

где  $F$  — площадь ствола, ветвей и облиственной части полосы на фронтальной проекции;  $F_0$  — площадь полосы в пределах ее внешнего контура.

Для определения параметров  $F$  и  $F_0$  полосы озеленения в местах отбора проб воздуха фотографировали (рис. 4). Затем снимки деревьев и кустарников копировали на кальку. После этого очертания полос вновь фотографировали на светлом фоне и определяли показатели их плотности путем помещения негативов в камеру фотоэлектроколориметра ФЭК-56. Коэффициент ажурности полос рассчитывали как отношение оптических плотностей негативов их изображения и засвеченного участка фотопленки — «непроницаемого экрана» с оптической плотностью, принятой за 100 %.

Газозащитную эффективность полос зеленых насаждений рассчитывали по формуле

$$\omega = (1 - q/q_0) \cdot 100, \quad (3)$$

где  $q$  — концентрация ингредиента в пункте наблюдения в пределах тротуарной части улицы, мг/м<sup>3</sup>;  $q_0$  — начальная концентрация ингредиента у края проезжей части, мг/м<sup>3</sup>.

При изучении рассеяния выбросов автомобилей на экспериментальном полигоне использовали модели полос зеленых насаждений плотной и продуваемой конструкций, согласно их характеристике, приведенной в работе Ф.Л. Серебровского [18]. Модели полос озеленения представляли собой металлические проволочные каркасы, изготовленные в масштабе 1:20 и заполненные до заданной плотности синтетическим волокном. При этом у плотной сверху донизу полосы площадь сквозных просветов не превышала 5 %, а у продуваемой полосы под плотной кроной был сквозной просвет на высоту 1–2 м. В эксперименте также применили макеты секций жилых зданий с соотношением высоты, длины и ширины 1:0,9:0,8, изготовленные из древесноволокнистой плиты. Участки улиц с застройкой и озеленением компоновались по центру площадки с асфальтобетонным покрытием.

В качестве источника ОГ использовали трубопровод, который подсоединялся к выпускной системе двигателя автомобиля. Из отверстий патрубков,



Рис. 4. Полосы зеленых насаждений плотной (а) и продуваемой (b) конструкции на городских улицах  
 Fig. 4. Green spaces of dense (a) and ventilated (b) structures on city streets

равномерно рассредоточенных по бокам основной трубы, строго горизонтально выходила смесь газов, что исключало влияние скорости и направления их выброса на вектор скорости воздушного потока в пунктах отбора проб воздуха.

Пробы воздуха отбирали в узлах сетки точек в пределах вертикальной плоскости, поперечной к оси макета улицы, путем его протяжки аспираторами ЭА-30 через стеклянные колбы с зажимами на входе и выходе. Для определения концентрации CO в пробах воздуха, отбираемых в натуральных условиях и при моделировании, использовался титрометрический газоанализатор ТГ-5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

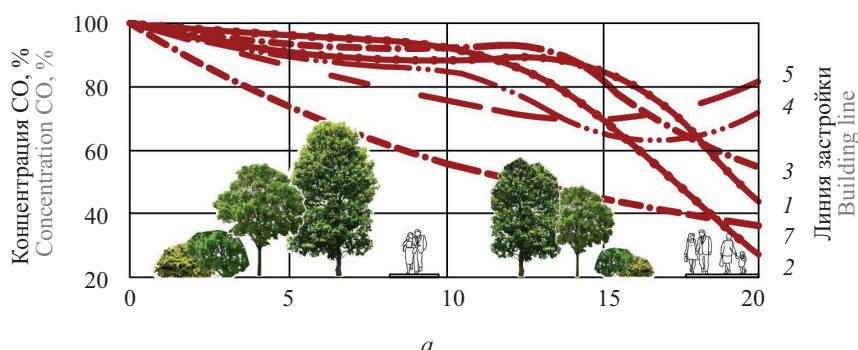
В результате натуральных наблюдений наиболее высокий уровень загрязнения воздуха NO + NO<sub>2</sub> и CO отмечен на улицах с высокой интенсивностью движения и большой долей грузовых автомобилей в потоке (Яблочкова, Победы, Кирова, Магнитогорская, Пирогова, Пушкина, Аристова, Кубанская, Славянская, Староверова и др.). Причиной повышенных концентраций компонентов ОГ является также незначительная ширина улиц в линиях застройки (Краматорская, Коммунистическая, Набережная Приволжского Затона и др.). Чрезмерное загрязнение атмосферного воздуха на данных улицах является следствием низкой скорости движения транспортных потоков (от 15 до 30 км/час) из-за высокой плотности магистральной уличной сети.

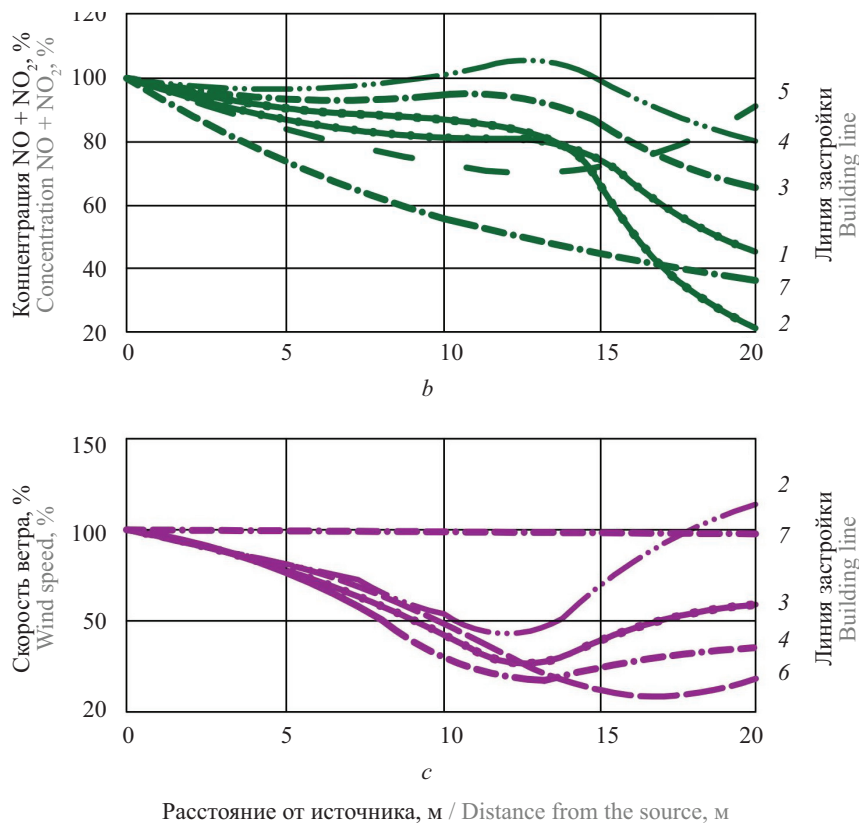
Как следует из результатов обследования пешеходного движения, выполненного при разработке

генерального плана г. Астрахани<sup>6</sup>, на улицах центральной планировочной зоны города наблюдается максимальная интенсивность пешеходных потоков. Озеленение этих улиц представлено в основном однорядными редкими посадками деревьев или практически отсутствует. В связи с этим проектно-планировочными мероприятиями предусмотрено повышение роли озеленения в снижении негативного воздействия транспорта на городскую среду, а также устройство полноценного поперечного профиля улиц города с расширением и максимально возможным сохранением зеленых насаждений.

В результате натуральных обследований установлены закономерности распределения концентраций NO + NO<sub>2</sub> и CO и трансформации воздушного потока поперечного направления по скорости на участках автомобильных дорог и улиц под воздействием зеленых насаждений (рис. 5). По характеру кривых 1–4 на рис. 5, b, c видно, что изменение концентрации данных ингредиентов с удалением от проезжей части происходит по идентичной зависимости. Это согласуется с теорией рассеяния газов П.И. Андреева [39], согласно которой благодаря охлаждению при турбулентной диффузии отдельные компоненты выброса быстро теряют свою динамическую индивидуальность, при этом плотности и удельные веса газовой смеси и окружающего воздуха становятся близкими. Исходя из этого, можно считать, что полученные закономерности изменения концентрации

<sup>6</sup> Структура пояснительной записки «Основные положения проекта генерального плана г. Астрахань». URL: [www.astragid.ru/upload-files/gp.doc](http://www.astragid.ru/upload-files/gp.doc)





**Рис. 5.** Изменение скорости ветра (*a*) и концентраций NO + NO<sub>2</sub> (*b*) и CO (*c*) в воздухе на улицах на высоте 1,5 м под воздействием четырехрядной посадки деревьев с двухрядным кустарником: 1–4 — при фронтальной застройке; 5 — без озеленения; 6 — при свободной застройке; 7 — на открытой территории; 1 —  $h = 0,3H$ ; 2 —  $h = 0,5H$ ; 3 —  $h = 0,7H$ ; 4 —  $h = H$ ;  $h$  и  $H$  — высота полосы озеленения и зданий, м; 100 % — скорость ветра и содержание CO и NO + NO<sub>2</sub> в воздухе над краем проезжей части

**Fig. 5.** Changes in wind speed (*a*) and concentrations of NO + NO<sub>2</sub> (*b*) and CO (*c*) in the air on streets at a height of 1.5 m under the influence of four-row planting of trees with two-row shrubs: 1–4 — for frontal construction; 5 — without landscaping; 6 — for free-standing construction; 7 — in an open area; 1 —  $h = 0.3H$ ; 2 —  $h = 0.5H$ ; 3 —  $h = 0.7H$ ; 4 —  $h = H$ ;  $h$  and  $H$  — the height of the landscaping strip and buildings, m; 100 % is the wind speed and the content of CO and NO + NO<sub>2</sub> in the air above the edge of the roadway

NO + NO<sub>2</sub> и CO репрезентативны по отношению ко всем токсичным газам в составе газоздушных смесей, проходящих через полосы озеленения на городских дорогах и улицах. По положению этих кривых на поперечном сечении улиц также видно, что наиболее низкий уровень загазованности устанавливается у линии застройки. При этом в полосах древесно-кустарниковых насаждений плотной конструкции «изолирующего» типа концентрации ингредиентов превышают уровень, отмечаемый на открытой территории. В данном случае загрязняющие вещества движутся с незначительной скоростью и задерживаются в пределах зеленой полосы из-за рассеяния энергии воздушного потока в ветвях древесных растений и кустарников [40]. При равной высоте деревьев и зданий скорость воздушного потока в пределах полосы озеленения и у линии застройки составляет 30–40 % от скорости ветра над проезжей частью (рис. 5, *a*, кривая 4). Поэтому для предупреждения очагового характера распределения концентрации ингредиентов в пределах полос

озеленения необходимо обеспечить беспрепятственное продвижение воздушных масс по «каналам» аэрации путем включения в дендрологический состав зеленых насаждений деревьев с высоким штамбом и увеличения расстояния между их рядами. Со стороны вхождения циркуляционных воздушных потоков во внутреннее пространство объектов озеленения требуется исключение кустарников [20].

С целью обеспечения оптимального аэрационного режима и снижения загазованности пешеходных коммуникаций и общественных пространств, организуемых в пределах полос озеленения, возникает необходимость введения в их структуру малых пейзажно-средозащитных групп древесно-кустарниковых растений. Со стороны проезжей части подкрановое пространство деревьев в этих группах следует закрывать кустарниками. Для реализации средозащитного потенциала такие группы должны иметь плотную структуру с максимальным объемом фитомассы.

Из сравнения кривых на рис. 5 следует, что при фронтальной застройке улиц многосекционны

ми зданиями на уровень концентрации  $\text{NO} + \text{NO}_2$  и  $\text{CO}$  в пределах тротуаров и у линии застройки существенное влияние оказывает высота линейно-полосных структур зеленых насаждений. При одинаковой высоте древесных растений  $h$  и зданий  $H$  здесь наблюдается повышение концентраций данных компонентов ОГ (кривые 4 на рис. 5, *b, c*). Это происходит вследствие снижения скорости воздушного потока, огибающего полосу сверху, в вершинах деревьев (кривая 4 на рис. 5, *a*). А при высоте полос озеленения  $h$  в пределах  $(0,3-0,7)H$  в зоне пешеходного движения и у зданий стимулируется интенсивный турбулентный обмен и происходит снижение концентрации ингредиентов в воздухе (кривые 1–3 на рис. 5, *b, c*). Максимальное снижение загазованности в зоне пешеходного движения между полосой зеленых насаждений и линией застройки наблюдается при  $h = 0,5H$  (кривые 2 на рис. 5, *b, c*). Как следует из результатов натурных обследований магистральных улиц с полосами озеленения разной конструкции, снижение уровня загрязнения воздуха оксидами азота  $\text{NO} + \text{NO}_2$  в этом случае достигает 95 % (табл. 2).

Из результатов натуральных наблюдений также видно, что при фронтальной застройке и высоте полос озеленения разной ширины на уровне средних этажей зданий снижение концентрации ОГ в пешеходной зоне между полосами озеленения разного типа и зданиями несколько выше, чем при свободной планировке застройки за красной линией. При пятиэтажной застройке такая разница по оксидам азота достигает 38–45 % (см. табл. 2). Очевидно, что при таком соотношении высот деревьев и фронтальной уличной застройки в системе «зеленая зона – здание» более высокая газозащитная эффективность зеленых насаждений обусловлена совместным влиянием полос озеленения и зданий на усиление аэрационного режима и эффективное рассеяние ингредиентов в пешеходных зонах.

Согласно натурным наблюдениям, эффективность снижения уровня загрязнения воздуха в пешеходных зонах и общественных пространствах, формируемых за полосами зеленых насаждений на автомобильных дорогах и в пределах тротуарной части магистральных улиц со свободной плани-

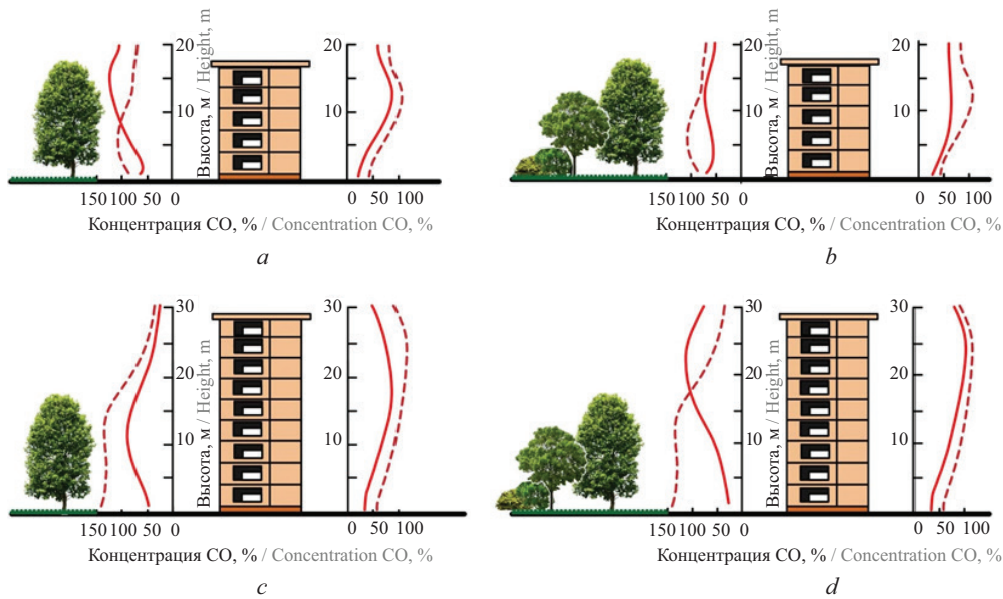
**Табл. 2.** Снижение концентрации оксидов азота  $\text{NO} + \text{NO}_2$  в воздухе пешеходных зон и общественных пространств на городских улицах полосами зеленых насаждений

**Table 2.** Reducing the concentration of nitrogen oxides  $\text{NO} + \text{NO}_2$  in the air of pedestrian zones and public spaces on city streets by strips of green spaces

Тип посадок Type of planting	Высота, м Height, m	Ширина, м Width, m	$K_{\text{аж}}$ $C_{\text{оп}}$	Ширина тротуарной части, м Width of the sidewalk, m	Этажность застройки Number of storeys of buildings	Снижение концентрации на участках, %* Reduction of concentration on sites, %*	
						со свободной застройкой with free development	с фронтальной застройкой with frontage development
Однорядная Single row	5	3–4	0,1–0,3	8–9	2–3	11–23	23–45
	8			11–12	5	12–25	20–40
Двухрядная с однорядным кустарником Two-row with a single-row shrub	8	6–8	0,3–0,6	15	5	24–38	45–65
	15			22		9	26–42
Трех-, четырехрядная с двухрядным кустарником Three- or four-row with a double-row shrub	8	10–15	0,5–0,8	20–25	5	34–47	65–85
	15			25–30		9	37–51
Пяти-, шестирядная с четырехрядным кустарником Five- and six-row with a four-row shrub	8	20–25	0,6–0,9	30–40	5	38–50	85–95
	15			35–45		9	42–55

*Примечание:* \* за 100 % принята концентрация  $\text{NO} + \text{NO}_2$  над краем проезжей части.

*Note:* \* — the concentration of  $\text{NO} + \text{NO}_2$  above the roadway edge is taken as 100 %.



**Рис. 6.** Вертикальные профили концентрации CO у фасадов жилых многосекционных зданий при их взаимодействии с полосой зеленых насаждений продуваемой (a, c) и плотной (b, d) конструкции: a, b — при  $h = H$ ; c, d — при  $h = 0,5H$ ; пунктир — распределение концентрации CO у фасадов зданий в отсутствие озеленения

**Fig. 6.** Vertical profiles of CO concentration at the facades of residential multi-section buildings when they interact with a strip of green spaces of a ventilated (a, c) and dense (b, d) design: a, b — at  $h = H$ ; c, d — at  $h = 0.5H$ ; dashed line — distribution of CO concentration near building facades in the absence of greenery

ровкой застройки (в %), может быть установлена по формуле:

$$\omega = 48(1 + 0,016h)K_{\text{аж}}^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где  $h$  и  $K_{\text{аж}}$  — высота, м, и коэффициент ажурности полосы озеленения.

На улицах с фронтальной застройкой снижение концентрации выбросов автомобилей в воздухе существенно зависит от ширины разделительных полос и тротуаров, высоты зданий, плотности и относительной высоты полос озеленения. С учетом этих параметров газозащитный эффект линейно-полосных структур зеленых насаждений, формируемых на городских улицах в системе «зеленая зона – здание», можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$\omega = 57 \left[ \frac{11b^{0,22} \left(1 + 2,63K_{\text{аж}}^{\frac{1}{3}}\right) h^{1,65}}{H^{1,87} e^{3,34h/H}} - 1 \right], \quad (5)$$

где  $b$  — расстояние от края проезжей части до линии застройки, м;  $H$  — высота зданий на линии застройки, м;  $e$  — основание натурального логарифма.

Из результатов эксперимента на моделях следует, что при изменении высоты полос зеленых насаждений разной конструкции изменяется и характер их воздействия на концентрацию ингредиентов в пешеходных зонах и у фасадов зданий. По положению кривых на рис. 6 видно, что в градозащитной системе «зеленая полоса – здание» средозащитные посадки растений являются особенно чувствитель-

ными к изменению их относительной высоты. Если при равенстве высот полосы  $h$  и здания  $H$  отмечаются повышенные концентрации CO в тротуарной части и у внешних фасадов зданий (рис. 6, a, b), то при  $h = 0,5H$  наблюдается существенное разбавление этой примеси у линии застройки и в зоне пешеходного движения (рис. 6, c, d).

По мере приближения высоты деревьев к высоте зданий отмечается дополнительное снижение загазованности у их дворовых фасадов за счет увеличения длины пути переноса и рассеяния примесей в верхнем слое атмосферы полосой плотной конструкции (рис. 6, b).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На магистральных дорогах и улицах, образующих транспортно-коммуникационный каркас в планировочной организации города, сосредотачиваются транспортные потоки высокой интенсивности, оказывающие негативное воздействие на городскую среду. Поэтому в зонах пешеходного движения и общественных пространствах, организуемых на участках УДС города и в пределах придорожных полос, вместе с размещением объектов обслуживания и устройством элементами благоустройства требуется формирование комфортного микроклимата, благоприятной акустической среды и обеспечение высокого качества атмосферного воздуха.

Для защиты жилых территорий поселений от сильных ветров используются замкнутые жилые группы с фронтальной застройкой. При низких скоростях ве-

тра и штиле в целях сохранения аэрационного потенциала и максимального снижения концентраций токсичных ингредиентов в воздухе городских улиц их проезжая часть должна быть доступной для воздушных потоков. Для этого уличное пространство раскрывается путем использования точечной застройки и расположения многосекционных зданий по направлению ветра.

Гигиенические нормативы содержания токсичных веществ в воздухе транспортных коммуникаций соблюдаются выбором наиболее рациональных градостроительных решений по планировке и застройке при оптимальной конструкции объектов озеленения, обеспечивающих комфортный аэрационный режим (табл. 3).

На городских дорогах и улицах для защиты от негативного воздействия транспорта жилой застройки и общественных пространств широко используются ландшафтно-средозащитные композиции и линейно-полосные структуры зеленых насаждений, имеющие форму чередующихся сплошных плоскостей в виде стен.

Максимальное снижение концентрации ОГ в воздухе придорожных территорий обеспечивают полосы зеленых насаждений шириной 15–30 м плотной кон-

струкции. Их газозащитная эффективность на 30 % выше, чем у полос озеленения продуваемой конструкции благодаря более выраженной изолирующей способности.

Для предупреждения высокого уровня загрязнения воздуха на полосах отвода автомобильных дорог и прилегающей территории токсичными компонентами выбросов автомобилей поперечному сечению придорожных полос озеленения необходимо задавать форму треугольника, легко обтекаемого ветром, с более пологой стороной по отношению к источнику. При этом требуется усиление их плотности в нижнем ярусе ( $K_{\text{аж}} \geq 0,7-0,8$ ) с постепенным уменьшением по высоте. В первые ряды растений со стороны проезжей части включаются кустарники в виде двухъярусной живой изгороди и деревья с низким штамбом. При этом опушечные ряды древесно-кустарниковых насаждений получают наибольшую дозу инсоляции и имеют наибольшую густоту ветвления и облиствения [37].

Для расширения зоны газозащитного воздействия полос озеленения на участках магистральных дорог, не связанных с жилой застройкой, в их составе следует предусматривать рядовую посадку высокорастущих деревьев (клены, вязы, тополя и др.).

Табл. 3. Градостроительные мероприятия по регулированию аэрационного режима и повышению качества атмосферного воздуха городских дорог и улиц

Table 3. Urban planning measures to regulate the aeration regime and improve the quality of atmospheric air in urban roads and streets

Стадии проектирования Design stages	Состав мероприятий The composition of events
Генеральный план города The general plan of the city	Использование рельефа, зеленых массивов и полос озеленения для защиты поселений от ветра. Трассирование магистральных улиц вдоль преобладающих ветров. Вывод транзитных и грузовых потоков автомобильного транспорта из городских центров и жилых зон путем строительства обходных дорог и кольцевых распределительных магистралей. Формирование в центральных планировочных районах городов бестранспортных зон с пешеходными улицами. Строительство дублеров магистральных дорог и улиц, кольцевых пересечений и транспортных развязок в разных уровнях. Формирование сети магистральных дорог непрерывного и скоростного движения с использованием подземного и надземного пространства. Развитие действующих и строительство новых линий внеуличного транспорта (метрополитена, скоростного трамвая, монорельсовой системы, речного трамвая) The use of topography, green areas, and green belts to protect settlements from the wind. Tracing main streets along prevailing winds. Removing transit and freight traffic from urban centers and residential areas by building bypass roads and ring distribution highways. Formation of non-transport zones with pedestrian streets in the central planning areas of cities. Construction of bypasses for main roads and streets, roundabouts, and multi-level interchanges. Formation of a network of continuous and high-speed trunk roads using underground and above-ground space. Development of existing and construction of new lines of off-street transport (metro, high-speed tram, monorail system, river tram)

Стадии проектирования Design stages	Состав мероприятий The composition of events
Проект детальной планировки жилого района The project of detailed planning of a residential area	Зонирование примагистральных территорий по качеству воздуха. Регулирование ветрового режима городских улиц в различных климатических областях приемами планировки, застройки и озеленения со снижением исходной скорости ветра в холодный период года или ее сохранением при недостаточно комфортном проветривании пешеходных коммуникаций и общественных пространств Zoning of near-road areas based on air quality. Regulation of the wind regime of city streets in various climatic zones by planning, development and landscaping techniques with a reduction in the initial wind speed during the cold period of the year or its maintenance with insufficiently comfortable ventilation of pedestrian communications and public spaces
Технический проект городской дороги и улицы Technical design of a city road and street	Повышение пропускной способности дорог и улиц путем расширения проезжей части*. Уширение проезжей части улиц на перекрестках. Строительство подземных и надземных пешеходных переходов. Устройство уширений-карманов на остановках общественного транспорта. Обеспечение разрывов между линией застройки и проезжей частью с учетом этажности зданий для эффективного рассеяния выбросов автомобильного транспорта. Выбор оптимальной конструкции объектов озеленения Increasing the capacity of roads and streets by widening the roadway*. Widening of street carriageways at intersections. Construction of underground and above-ground pedestrian crossings. Installation of extensions at public transport stops. Ensuring gaps between the building line and the roadway, taking into account the number of storeys in the buildings, to effectively dissipate vehicle emissions. Choosing the optimal design of landscaping facilities

Примечание: \* — категория дорог и улиц и требуемая ширина проезжей части устанавливаются в соответствии с СП 42.13330.2016.

Note: \* — the category of roads and streets and the required width of the carriageway are determined in accordance with SP 42.13330.2016.

Высота деревьев не менее 7–8 м, кустарников — не менее 1,5–2 м. Со стороны источника должна быть обеспечена полная фронтальная сомкнутость растений в рядах. На застроенных участках УДС использование полос озеленения плотной конструкции с крупномерными деревьями возможно в сочетании с фронтально расположенными зданиями нежилого назначения в виде системы экранов.

На городских улицах в пределах тротуаров и у фасадов зданий, обращенных к проезжей части, наименьшие концентрации компонентов ОГ в воздухе отмечаются при достижении полосами зеленых насаждений уровня средних этажей. С дальнейшим увеличением высоты полос озеленения в градозоологической системе «зеленая полоса – фронтальная застройка» их газозащитная роль перераспределяется на внутриквартальное пространство.

Из этого следует, что для обеспечения достаточного воздухообмена в пешеходных зонах и общественных пространствах, формируемых в пределах тротуарной части городских улиц между крайней разделительной полосой и линией застройки, высоту полос озеленения необходимо ограничивать у средних этажей зданий систематическими конструктивными рубками путем обрезки стволов деревьев. Для этого ден-

дрологический состав полос озеленения должен быть представлен породами древесных растений, легко переносящих рубки и дающих новые побеги (тополя, клены остролиственный и ясенелистный, ясень, ива, липа и др.). Переформирование неравномерно ажурных полос в более плотные достигается применением рубок ухода (рубки омоложения, стрижки). Конструктивные рубки и стрижки следует производить в летний период, когда деревья находятся в облиственном состоянии и есть возможность правильно отобрать ветви для обрезки или удаления.

При выборе породно-видового состава насаждений в полосах озеленения улиц необходимо учитывать конкурентные взаимоотношения отдельных пород между собой в процессе роста, выделять главные породы, дополнительные и декоративные (отделочные). Насаждения для уличного озеленения должны быть достаточно газоустойчивыми. Например, в лесорастительных условиях Волгограда этим требованиям отвечают клены ясенелистный и татарский, тополь канадский, ясень обыкновенный, айлант, акация белая, жимолость.

Формирование в полосах озеленения чисто монокультурных древостоев нецелесообразно по причине быстрого самоизреживания в условиях города,

из-за чего их экранирующие свойства ослабляются. Лучше развиваются и в меньшей степени подвергаются воздействию вредителей смешанные насаждения. Им легче придать форму, обеспечивающую лучшие средозащитные качества, например выраженную ярусность [37].

С целью получения в короткие сроки требуемой густоты и скорейшего вступления полос озеленения в работу следует использовать быстрорастущие породы растений, а для обеспечения круглогодичной работы включать в их видовой состав хвойные насаждения (ель колючая, сосна румелийская, туя западная, можжевельники и др.) и лиственные деревья и кустарники с длительным периодом вегетации. Для периферийно-периметральных полос зеленых насаждений, создаваемых у границ парковых территорий со стороны магистральных дорог и улиц, доля участия хвойных насаждений в реализации защитных свойств рекомендуется не менее 30–40 % [20]. Хвойные растения способны адсорбировать из атмосферы цинк, кобальт, хром, медь, титан, молибден, свинец. Из лиственных пород наилучшими адсорбентами свинца являются клен остролистный и тополь, железа и марганца — каштан конский обыкновенный, серы — клен остролистный и липа мелколистная [41]. Значительной способностью улавливать аэрозоли и пыль обладают вяз, шелковица, бузина, рябина, сирень [33].

При достаточно большой ширине полос зеленых насаждений на участках улиц (>15 м) возможно их переформирование в скверы с подчинением планировочной композиции направлениям пешеходных коммуникаций, связанным с реализацией наиболее характерных социальных функций (информационных, культурно-просветительных, мемориальных, выставочных, игровых, спортивно-оздоровительных и др.). Вместе с выделением участков для проведения общественных мероприятий с соответствующими стендами и экспонатами скверы обустраиваются элементами благоустройства, стимулирующими физическую активность посетителей — дорожками для пешех прогулок и бега трусцой, площадками

для игр детей и т.д., что полностью соответствует концепции многофункционального развития объектов озеленения [42]. «Контактное» расположение скверов относительно проезжей части, транспортных коммуникаций требует повышения их средозащитных качеств. Для получения высокого средозащитного потенциала скверов под древесно-кустарниковые насаждения отводится более 50 % территории, а под газон — не более 10 % [20]. При этом вокруг скверов высаживается один-два яруса кустарников в виде изгороди и обеспечивается сомкнутость крон древесных растений для защиты от распространения с проезжей части выбросов автомобилей и транспортного шума.

На недостаточно проветриваемых участках магистральных улиц малой ширины, характерных для центральных планировочных зон городов с плотной исторически сложившейся застройкой, комфортный аэрационный режим и гигиенические нормативы выбросов автомобилей обеспечивают продуваемые линейно-полосные и групповые структуры древесных растений с открытым подкroновым пространством.

С практической точки зрения при выборе планировочных и конструктивных решений объектов озеленения транспортных и пешеходных коммуникаций в городах необходимо учитывать комплексный характер их оздоровительного воздействия. При этом один и тот же структурно-конструктивный тип полосы может одновременно оказать оптимизирующее воздействие на акустический режим, качество атмосферного воздуха и микроклиматические факторы. В проектной практике вместе с новыми теоретическими и экспериментальными разработками в сфере экологического строительства следует использовать в качестве апробированных ориентиров реализованные композиционные приемы планировки, застройки и озеленения городских улиц, обеспечивающие по результатам социально-гигиенического мониторинга высокое качество среды в зонах пешеходного движения и общественных пространствах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иванова А.А.* Территориальное планирование системы общественных пространств городского района // *Экология урбанизированных территорий*. 2024. № 3. С. 70–75. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-3-70-75. EDN DGRLSJ.
2. *Данилина Н.В., Теплова И.Д.* «Устойчивая» улица — формирование общественных пространств на городских улицах // *Экология урбанизированных территорий*. 2018. № 4. С. 74–80. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14074. EDN YYFSYP.
3. *Банникова Л.А.* Пространственная организация участка улицы в зависимости от характера использования // *Вестник Белгородского государственного*

технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 5. С. 105–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-105-115. EDN FHFVGL.

4. *Данилина Н.В., Сапрыкин Ю.В.* Оценка интенсивности использования общественных пространств городских улиц в целях устойчивого развития городов // *Экология урбанизированных территорий*. 2022. № 4. С. 65–69. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-4-65-69. EDN CVLRZN.

5. *Данилина Н.В., Сапрыкин Ю.В.* Проблематика и перспективы развития общественных пространств городских улиц на примере улиц Москвы // *Экология урбанизированных территорий*. 2023. № 2.

С. 90–96. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-2-90-96. EDN XVGUNR.

6. *Зенцов В.Н.* Совершенствование методологии эколого-системного подхода к проектированию городской транспортной инфраструктуры : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 160 с.

7. *Балакин В.В.* Закономерности формирования концентраций отработавших газов автомобильного транспорта в каньонах городских улиц // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. № 9 (28). С. 76–82. EDN KZHUTT.

8. *Балакин В.В.* Расчет загрязнения атмосферного воздуха на застраиваемых участках городских дорог // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 18 (37). С. 138–143. EDN LFRHVQ.

9. *Кандрор И.С., Демина Д.М., Ратнер Е.М.* Физиологические принципы санитарно-климатического районирования территории СССР. М. : Медицина, 1974. 174 с.

10. *Лавров В.А., Солофенко Н.А., Смоляр И.М. и др.* Справочник проектировщика: Градостроительство. М. : Стройиздат, 1978, 367 с.

11. *Пинигин М.А., Сидоренко В.Ф., Антюфеев А.В., Балакин В.В.* Выбор градостроительных решений по снижению загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах выбросами автомобильного транспорта // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 2. С. 92–98. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98. EDN BGEMUA.

12. *Мяжков М.С.* Пример моделирования микроклиматических условий для г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 32 (51). С. 220–228. EDN RUGTXX.

13. *Балакин В.В., Алексиков С.В., Чеснокова О.Г.* Обеспечение комфортного аэрационного режима и повышение качества атмосферного воздуха городских улиц средствами планировки // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сб. мат. IX Междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева. 2024. С. 238–243. EDN IAMKSO.

14. *Гиясов А., Баротов Ю.Г.* Роль зеленых насаждений в оздоровлении микроклимата городской застройки южных районов // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 3. С. 90–97. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13090. EDN YQITXF.

15. *Балакин В.В.* Учет пространственно-временной динамики загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций в градостроительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строи-

тельство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 340–352. EDN WKZILQ.

16. *Семашко К.И.* Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. М. : Стройиздат, 1986. 59 с.

17. *Максимова В.А.* Гигиеническая оценка планировочных средств защиты воздуха городов от загрязнения выбросами автотранспорта // Гигиена и санитария. 1971. № 10. С. 11–13.

18. *Серебровский Ф.Л.* Аэрация населенных мест. М. : Стройиздат, 1985. 172 с.

19. *Балакин В.В., Алексиков С.В., Азаров В.Н.* Обеспечение качества атмосферного воздуха на магистральных улицах и в жилой застройке средствами планировки и озеленения // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 7. С. 639–647. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-7-639-647. EDN XVDITO.

20. *Городков А.В.* Ландшафтно-средозащитное озеленение и его влияние на экологическое состояние крупных городов Центральной России : дис. ... д-ра сельскохозяйств. наук. СПб. : Брянск, 2000. 649 с.

21. *Hansen R., Frantzeskaki N., McPhearson T., Rall E., Kabisch N., Kaczorowska A. et al.* The uptake of the ecosystem services concept in planning discourses of European and American cities // Ecosystem Services. 2015. Vol. 12. Pp. 228–246. DOI: 10.1016/j.ecoser.2014.11.013

22. *Lee A., Jordan H.C., Horsley J.* Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: prospects for planning // Risk Management and Healthcare Policy. 2015. Vol. 8. Pp. 131–137. DOI: 10.2147/RMHP.S61654

23. *Badiu D.L., Iojă C.I., Patroescu M., Breuste J., Artmann M., Nița M.R. et al.* Is urban green space per capita a valuable target to achieve cities' sustainability goals? Romania as a case study // Ecological Indicators. 2016. Vol. 70. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.044

24. *Yao M., Smith M., Peng C.* Modelling the effects of vegetation and urban form on air quality in real urban environments : a systematic review of measurements, methods, and predictions // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 105. P. 128693. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128693

25. *Cai Y., Li C., Pan C., Wang G., Xu J., Cui W. et al.* Quantifying the impact of single-tree morphological characteristics on the vertical gradient cooling effect and human thermal comfort during summer // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 107. P. 128789. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128789

26. *Kofel D., Bourgeois I., Paganini R., Pulfer A., Grossiord C., Schmale J.* Quantifying the impact of urban trees on air quality in Geneva, Switzerland // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. P. 128513. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128513

27. *Gillerot L., Landuyt D., De Frenne P., Muys B., Verheyen K.* Urban tree canopies drive human heat stress

mitigation // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024. Vol. 92. P. 128192. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128192

28. *Guerra G., Crisci A., Morabito M.* Urban microclimate simulations based on GIS data to mitigate thermal hot-spots: Tree design scenarios in an industrial area of Florence // *Building and Environment*. 2023. Vol. 245. P. 110854. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110854

29. *Yan S., Zhang T., Wu Y., Lv C., Qi F., Chen Y. et al.* Cooling Effect of Trees with Different Attributes and Layouts on the Surface Heat Island of Urban Street Canyons in Summer // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. Issue 5. P. 857. DOI: 10.3390/atmos14050857

30. *Sharmin M., Tjoelker M.G., Pfautsch S., Esperon-Rodriguez M., Rymer P.D., Power S.A.* Tree crown traits and planting context contribute to reducing urban heat // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2023. Vol. 83. P. 127913. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.127913

31. *Li Y., Ren C., Ho J.Y., Shi Y.* Landscape metrics in assessing how the configuration of urban green spaces affects their cooling effect : a systematic review of empirical studies // *Landscape and Urban Planning*. 2023. Vol. 239. P. 104842. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104842

32. *Wang X., Rahman M.A., Mokoš M., Rötzer T., Pattnaik N., Pang Y. et al.* The influence of vertical canopy structure on the cooling and humidifying urban microclimate during hot summer days // *Landscape and Urban Planning*. 2023. Vol. 238. P. 104841. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104841

33. *Чернышенко О.В.* Поглощительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города : дис. ... д-ра биол. наук. М., 2001. 200 с. EDN NLVTAP.

34. *Мамин П.Г.* Эколого-экономические методы регулирования качества окружающей среды урба-

низированных территорий : дис... канд. экон. наук. М., 2003. 133 с.

35. *Ивченко Т.В., Романова Р.А., Короткова Е.Ю.* Озеленение крупных населенных пунктов как компенсация загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом // *Экология урбанизированных территорий*. 2014. № 1. С. 30–33. EDN SGHSSH.

36. *Данилина Н.В., Теплова И.Д., Тряпкин П.В., Смирнова Т.М.* Тенденции развития общественных пространств городских улиц на примере города Краснодара // *Экология урбанизированных территорий*. 2021. № 2. С. 59–67. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-2-59-67. EDN QUZDPQ.

37. *Городков А.В.* Рекомендации по проектированию средозащитного озеленения территорий городов. СПб., 1998. 141 с.

38. *Пережуд Е.А., Гернет Е.В.* Химический анализ воздуха промышленных предприятий: рекомендуемые методы определения предельно допустимых концентраций вредных веществ в воздухе. Л. : Химия, 1973. 440 с.

39. *Андреев П.И.* Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями. М. : Госиздат, 1952. 81 с.

40. *Nielsen M.* Turbulent ventilation of a street canyon // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2000. Vol. 65. Issue 1–2. Pp. 389–396. DOI: 10.1023/a:1006416909682

41. *Нижник М.С.* Лес и отдых. Киев : Наукова думка, 1989. 111 с.

42. *Nordbø E.C.A., Nordh H.* Green space visitation: A capacity builder for self-perceived health and subjective wellbeing among urban citizens // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025. Vol. 107. P. 128777. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128777

Поступила в редакцию 2 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 22 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 22 января 2026 г.

Об авторе: **Владимир Васильевич Балакин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 496764, Scopus: 7005080548, ORCID: 0009-0008-4757-2950; balakin-iaais@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Ivanova A.A. Territorial planning of the system of public spaces of the urban area. *Ecology of Urban Areas*. 2024; 3:70-75. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-3-70-75. EDN DGRLSJ. (rus.).

2. Danilina N.V., Teplova I.D. “Sustainable” street — formation public spaces on city streets. *Ecology of Urban Areas*. 2018; 4:74-80. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14074. EDN YYFSYP. (rus.).

3. Bannikova L. Spatial organization of a street section depending on the nature of use. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023; 5:105-115. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-105-115. EDN FHFVGL. (rus.).

4. Danilina N.V., Saprykin Y. Assessment of intensity of use of public spaces of city streets for the purpose of sustainable urban development. *Ecology of Ur-*

*ban Areas*. 2022; 4:65-69. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-4-65-69. EDN CVLRZN. (rus.).

5. Danilina N.V., Saprykin Yu.V. Problems and Prospects of Developing Public Spaces in Urban Streets: The Case of Moscow Streets. *Ecology of Urban Areas*. 2023; 2:90-96. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-2-90-96. EDN XVGUNR. (rus.).

6. Zentsov V.N. *Improving the methodology of the ecological and systematic approach to the design of urban transport infrastructure : dis. ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 1999; 160. (rus.).

7. Balakin V.V. Regularities of the formation of automobiles' exhaust gases concentrations in the canyons of city streets. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2008; 9(28):76-82. EDN KZHYYT. (rus.).

8. Balakin V.V. Calculation of atmospheric air pollution within urban roads framed with buildings. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2010; 18(37):138-143. EDN LFPHVQ. (rus.).

9. Kandror I.S., Dyomina D.M., Ratner E.M. *Physiological principles of sanitary and climatic zoning of the USSR territory*. Moscow, Medicine, 1974; 176. (rus.).

10. Lavrov V.A., Solofnenko N.A., Smolyar I.M. et al. *Designer's Handbook: Urban Planning*. Moscow, Stroyizdat, 1978; 367. (rus.).

11. Pinigin M.A., Sidorenko V.F., Antyufeyev A.V., Balakin V.V. Architectural choices aimed at reducing the air pollution by vehicle emissions in residential areas. *Hygiene and Sanitation*. 2021; 100(2):92-98. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98. EDN BGEMUA. (rus.).

12. Myagkov M.S. Example of modelling of microclimatic conditions for Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2013; 32(51):220-228. EDN RUGTTX. (rus.).

13. Balakin V.V., Aleksikov S.V., Chesnokova O.G. Ensuring a comfortable aeration regime and improving the atmospheric air quality of city streets planning tools. *Architectural, Construction, and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, and Innovations : Collection of Materials from the 9th International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 120th Anniversary of K.A. Artemyev*. 2024; 238-243. EDN IAMKSO. (rus.).

14. Giyasov A., Barotov Y.G. The role of green spaces in improving the microclimate of urban development of the southern regions of SNG. *Ecology of Urban Areas*. 2018; 3:90-97. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13090. EDN YQITXF. (rus.).

15. Balakin V.V. Accounting for spatiotemporal dynamics of air pollution at the transport communications in urban planning. *Bulletin of the Volgograd State*

*University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020; 4(81):340-352. EDN WKZILO. (rus.).

16. Semashko K.I. *Guidelines for assessing and regulating the wind conditions in residential areas*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 59. (rus.).

17. Maksimova V.A. Hygienic assessment of planning means of urban air protection from pollution by vehicle emissions. *Hygiene and Sanitation*. 1971; 10:11-13. (rus.).

18. Serebrovsky F.L. *Aeration of Settlements*. Moscow, Stroyizdat; 1985; 172. (rus.).

19. Balakin V.V., Aleksikov S.V., Azarov V.N. Ensuring the quality of atmospheric air on main streets and in residential buildings by means of planning and landscaping. *Hygiene and Sanitation*. 2023; 102(7):639-647. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-7-639-647. EDN XVDITO. (rus.).

20. Gorodkov A.V. *Landscape and environmental protection landscaping and its impact on the ecological status of large cities in Central Russia : dis. ... doctor of agricultural sciences*. St. Petersburg, Bryansk, 2000; 649. (rus.).

21. Hansen R., Frantzeskaki N., McPhearson T., Rall E., Kabisch N., Kaczorowska A. et al. The uptake of the ecosystem services concept in planning discourses of European and American cities. *Ecosystem Services*. 2015; 12:228-246. DOI: 10.1016/j.ecoser.2014.11.013

22. Lee A., Jordan H.C., Horsley J. Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: prospects for planning. *Risk Management and Healthcare Policy*. 2015; 8:131-137. DOI: 10.2147/RMHP.S61654

23. Badiu D.L., Iojă C.I., Patroescu M., Breuste J., Artmann M., Nița M.R. et al. Is urban green space per capita a valuable target to achieve cities' sustainability goals? Romania as a case study. *Ecological Indicators*. 2016; 70:53-66. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.044

24. Yao M., Smith M., Peng C. Modelling the effects of vegetation and urban form on air quality in real urban environments : a systematic review of measurements, methods, and predictions. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025; 105:128693. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128693

25. Cai Y., Li C., Pan C., Wang G., Xu J., Cui W. et al. Quantifying the impact of single-tree morphological characteristics on the vertical gradient cooling effect and human thermal comfort during summer. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025; 107:128789. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128789

26. Kofel D., Bourgeois I., Paganini R., Pulfer A., Grossiord C., Schmale J. Quantifying the impact of urban trees on air quality in Geneva, Switzerland. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024; 101:128513. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128513

27. Gillerot L., Landuyt D., De Frenne P., Muys B., Verheyen K. Urban tree canopies drive human heat stress mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024; 92:128192. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128192

28. Guerri G., Crisci A., Morabito M. Urban microclimate simulations based on GIS data to mitigate thermal hot-spots: Tree design scenarios in an industrial area of Florence. *Building and Environment*. 2023; 245:110854. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110854
29. Yan S., Zhang T., Wu Y., Lv C., Qi F., Chen Y. et al. Cooling Effect of Trees with Different Attributes and Layouts on the Surface Heat Island of Urban Street Canyons in Summer. *Atmosphere*. 2023; 14(5):857. DOI: 10.3390/atmos14050857
30. Sharmin M., Tjoelker M.G., Pfautsch S., Esperson-Rodriguez M., Rymer P.D., Power S.A. Tree crown traits and planting context contribute to reducing urban heat. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2023; 83:127913. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.127913
31. Li Y., Ren C., Ho J.Y., Shi Y. Landscape metrics in assessing how the configuration of urban green spaces affects their cooling effect : a systematic review of empirical studies. *Landscape and Urban Planning*. 2023; 239:104842. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104842
32. Wang X., Rahman M.A., Mokoš M., Rötzer T., Pattnaik N., Pang Y. et al. The influence of vertical canopy structure on the cooling and humidifying urban microclimate during hot summer days. *Landscape and Urban Planning*. 2023; 238:104841. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104841
33. Chernyshenko O.V. *Absorption capacity and gas resistance of woody plants in urban conditions : diss. ... doctor of biological sciences*. Moscow, 2001; 200. EDN NLVTAP. (rus.).
34. Mamin R.G. *Ecological and Economic Methods of Regulating the Environmental Quality of Urbanized Areas : dis. ... cand. of economic sciences*. Moscow, 2003; 133. (rus.).
35. Ivchenko T.V., Romanova R.A., Korotkova E.Yu. Planting of greenery large settlements as compensation of air pollution by road. *Ecology of Urban Areas*. 2014; 1:30-33. EDN SGHSSH. (rus.).
36. Danilina N.V., Teplova I.D., Tryapkin P.V., Smirnova T.M. Modern trends in the city streets public spaces land use on the example of the Krasnodar city. *Ecology of Urban Areas*. 2021; 2:59-67. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-2-59-67. EDN QUZDPQ. (rus.).
37. Gorodkov A.V. *Recommendations for the design of environmental protection landscaping in urban areas*. St. Petersburg, 1998; 141. (rus.).
38. Peregud E.A., Gernet E.V. *Chemical analysis of industrial air: recommended methods for determining the maximum permissible concentrations of harmful substances in the air*. Leningrad, Chemistry, 1973; 440. (rus.).
39. Andreev P.I. *Dispersion of gases emitted by industrial enterprises in the air*. Moscow, Gosizdat, 1952; 81. (rus.).
40. Nielsen M. Turbulent ventilation of a street canyon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2000; 65(1-2):389-396. DOI: 10.1023/a:1006416909682
41. Nizhnik M.S. *Forest and Recreation*. Kiev, Naukova Dumka, 1989; 111. (rus.).
42. Nordbø E.C.A., Nordh H. Green space visitation: A capacity builder for self-perceived health and subjective wellbeing among urban citizens. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025; 107:128777. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128777

Received June 2, 2025.

Adopted in revised form on December 22, 2025.

Approved for publication on January 22, 2026.

**B I O N O T E S :** **Vladimir V. Balakin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Operation of Transport Facilities, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 496764, Scopus: 7005080548, ORCID: 0009-0008-4757-2950; balakin-iaais@yandex.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074:531.391.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.186-194

## Формулы для двух первых частот собственных колебаний плоской фермы

Михаил Николаевич Кирсанов, Ольга Валерьевна Грибова

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расчет частоты собственных колебаний входит в основу исследования динамики конструкций и базируется, как правило, на численных методах. В тех случаях, когда конструкция статически определима и имеет периодическую структуру, для оценки первой собственной частоты возможны и аналитические решения. Наиболее известны метод Рэлея для оценки частоты сверху и метод Донкерлея, дающий приближенную оценку снизу. Выводятся простые аналитические оценки зависимостей первых частот колебаний плоской фермы от числа панелей и параметров конструкции.

**Материалы и методы.** Балочная статически определимая ферма имеет подъем в средней части. Для аналитического расчета первой частоты собственных колебаний используется упрощенный вариант метода Донкерлея. Усилия в стержнях, входящие в формулу, рассчитываются в символической форме методом вырезания узлов с применением стандартных операторов системы компьютерной математики Maple. Для установления жесткости конструкции применяется формула Максвелла – Мора. Предполагается, что масса фермы равномерно распределена по всем ее узлам. С целью обобщения последовательности отдельных решений для ферм различного порядка на произвольное число панелей используется метод индукции. Формула для второй собственной частоты получается методом трехточечной коллокации, исходя из условия подобия кривой зависимости первой частоты от числа панелей.

**Результаты.** Выведены формулы для двух первых частот собственных колебаний фермы. Аналитические решения сравниваются с численными, полученными для всего спектра частот. Показано, что с увеличением числа панелей точность аналитических решений растет.

**Выводы.** Аналитический метод оценки первой и второй частоты применим для решения задач о регулярных конструкциях. Преимущество метода состоит в независимости его точности от порядка регулярности конструкции. Простая форма результата позволяет использовать разработанный метод для выбора оптимальных параметров объекта без трудоемких компьютерных вычислений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плоская ферма, аналитическое решение, собственная частота, Maple, метод Донкерлея, метод коллокации, вторая собственная частота

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н., Грибова О.В. Формулы для двух первых частот собственных колебаний плоской фермы // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 186–194. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.186-194

Автор, ответственный за переписку: Михаил Николаевич Кирсанов, c216@ya.ru.

## Formulas for the first two frequencies of natural oscillations of a flat truss

Mikhail N. Kirsanov, Olga V. Gribova

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Calculation of the natural oscillation frequency is the basis of the study of structural dynamics and is usually based on numerical methods. In cases where the structure is statically determinate and has a periodic structure, analytical solutions are also possible for estimating the first natural frequency. The most well-known here are the Rayleigh method for estimating the frequency from above and the Dunkerley method, which gives an approximate estimate from below. In this paper, simple analytical estimates are derived for the dependences of the first oscillation frequencies of a flat truss on the number of panels and the parameters of the structure.

**Materials and methods.** A statically determinate beam truss has a rise in the middle part. A simplified version of the Dunkerley method is used for the analytical calculation of the first natural oscillation frequency. The forces in the rods included in the formula are calculated in symbolic form by cutting out nodes using standard operators of the Maple computer mathematics system. The Maxwell – Mohr formula is used to determine the rigidity of the structure. It is assumed that the truss mass is uni-

formly distributed over all its nodes. The induction method is used to generalize the sequence of individual solutions for trusses of different orders to an arbitrary number of panels. The formula for the second natural frequency is obtained by the three-point collocation method based on the condition of similarity of the curve of the first frequency dependence on the number of panels. **Results.** Formulas for the first two frequencies of natural oscillations of the truss are derived. Analytical solutions are compared with numerical ones obtained for the entire frequency spectrum. It is shown that with an increase in the number of panels, the accuracy of the analytical solution increases.

**Conclusions.** The analytical method for estimating the first and second frequencies is applicable to solving problems on regular structures. The advantage of the method is that its accuracy is independent of the order of regularity of the structure. The simple form of the result allows it to be used to select the optimal parameters of the object without the use of labor-intensive computer calculations.

**KEYWORDS:** planar truss, analytical solution, natural frequency, Maple, Dunkerley method, collocation method, second natural frequency

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N., Gribova O.V. Formulas for the first two frequencies of natural oscillations of a flat truss. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):186-194. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.186-194 (rus.).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач строительной механики — расчет собственных частот конструкций. На практике для этого широко используются численные методы с применением специальных инженерных программ на основе метода конечных элементов [1, 2]. Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода использовался в монографии [3] применительно к задачам строительной механики. Аналитические решения задач колебаний строительных конструкций появились в связи с развитием методов компьютерной математики [4, 5]. Расчет прогибов свободно опертой пластины в системе компьютерной математики Maple выполнен в труде [6]. В этой же системе произведен приближенный аналитический расчет тонкой пластины [7]. Рассматривается изгиб прямоугольной защемленной тонкой пластины под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки [8]. Для этого решение уравнения Софи Жермен строится методом начальных функций. Справочник [9] содержит 126 различных схем плоских статически определимых регулярных ферм с формулами зависимостей первой собственной частоты от числа панелей. Решения получены методом индукции с помощью модифицированной формулы Донкерлея. Получена формула для собственной частоты колебаний пространственной консольной фермы в системе Maple [10]. Зависимость области резонансно безопасных частот собственных колебаний фермы от ее размеров исследуется в работах [11, 12]. Применен упрощенный аналитический метод [13] при выводе конечной формулы для основной ча-

стоты колебаний симметричной арочной фермы. Формула для прогиба пространственной регулярной фермы получена в работе [14]. Применялся также метод индукции и система компьютерной математики Maple. При этом время символьных преобразований для вывода искомых зависимостей было существенно больше, чем для плоских ферм. Получены аналитические оценки собственной частоты колебаний сверху (по методу Рэлея) и снизу (по методу Донкерлея) [15] для простой плоской фермы с треугольной решеткой. Найдена односторонняя оценка основной частоты колебаний пространственной фермы в аналитической форме [16]. Выполнен расчет значения первой частоты собственных колебаний плоской фермы с грузом с использованием системы Maple [17]. Формула для основной частоты собственных колебаний плоской модели составной фермы получена в исследовании [18]. Выведена зависимость прогибов плоской консольной фермы от числа панелей [19]. Большинство аналитических решений как для прогибов, так и для первой собственной частоты получено с применением свойств регулярности ферм [20]. Математический аппарат вывода зависимости прогиба или собственной частоты колебаний от числа панелей регулярной конструкции основан на индуктивном методе нахождения общего члена последовательности ряда решений для ферм различного порядка. При этом, как правило, используется метод составления и решения рекуррентных уравнений для коэффициентов искомой формулы. Для определения нижней границы частоты собственных колебаний плоской балочной фермы без нижнего пояса в аналитической форме применен метод индукции [21].

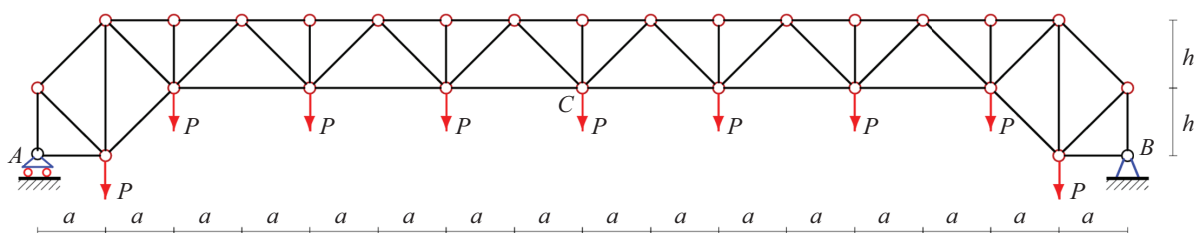


Рис. 1. Схема фермы. Нагрузка на нижний пояс,  $n = 3$

Fig. 1. Truss diagram. Load on the lower chord,  $n = 3$

В настоящей работе выводятся формулы для двух первых частот собственных колебаний плоской фермы с треугольной решеткой и подъемом в ее средней части. Ферма шарнирно оперта по концам (рис. 1), средняя часть пролета имеет треугольную решетку и приподнята на величину  $h$ . Для увеличения локальной устойчивости конструкции стержни верхнего сжатого пояса выбраны в два раза короче, чем в нижнем поясе. Высота фермы  $2h$ , принято четное число панелей в нижнем поясе длиной  $2a$  каждая. Длина раскосов  $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ .

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

*Расчет усилий в стержнях.* Ферма с  $2n$  панелями в пролете статически определимая. Общее число шарнирных узлов в ферме  $K = 6n + 10$ , число стержней, включая три стержня, моделирующие боковые опоры,  $\eta = 12n + 30$ . Выбирается инерционная модель конструкции, в которой вся масса условно равномерно распределена по ее узлам сосредоточенными массами  $m$ . Стержни модели массой не обладают. Для определения усилий в стержнях используется метод вырезания узлов, реализованный в программе [9], составленной на языке компьютерной математики Maple. Разрешающая система уравнений состоит из уравнений равновесия всех узлов, коэффициентами в которых являются направляющие косинусы неизвестных усилий и реакций опор. В предположении, что начало координат находится в левой подвижной опоре, координаты узлов (рис. 2) имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1 = 0; y_1 = 0; x_2 = a; y_2 = 0; \\ x_{i+2} = 2ai; y_{i+2} = h; i = 1, \dots, 2n + 1; \\ x_{2n+4} = L_0 - a; y_{2n+4} = 0; x_{2n+5} = L_0; y_{2n+5} = 0; \\ x_{2n+6} = 0; y_{2n+6} = h; \\ x_{i+2n+6} = ai; y_{i+2n+6} = 2h; i = 1, \dots, 4n + 3; \\ x_{6n+10} = L_0; y_{6n+10} = h, \end{aligned}$$

где  $L_0 = 4a(n + 1)$  — длина пролета.

Номера концов стержней записываются в ориентированные списки  $\Phi_i, i = 1, \dots, \eta$ . Нижний пояс кодируется неориентированными списками вида:  $\Phi_i = [i, i + 1], i = 1, \dots, 2n + 4$ , а стержни верхнего пояса:  $\Phi_{i+2n+5} = [i + 2n + 5, i + 2n + 6], i = 1, \dots, 4n + 4$ . Аналогично составляются списки концов других

стержней. Матричная форма системы уравнений равновесия имеет вид:  $\mathbf{GS} = \mathbf{T}$ , где  $\mathbf{S}$  — вектор неизвестных усилий и реакции опор. Внешние нагрузки содержатся в векторе  $\mathbf{T}$  длиной  $\eta$ . Нагрузки на узел с номером  $i$ , направленные горизонтально, записываются в элементы этого вектора с нечетными номерами:  $T_{2i-1}$ , вертикальные — в элементы  $T_{2i}$  на четных строках. Решение находится методом обратной матрицы с помощью операторов системы Maple:  $\mathbf{S} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{T}$  [9].

*Прогиб.* Для вычисления прогиба, который оценивается по величине вертикального смещения узла  $C$  (рис. 1), используется формула Максвелла – Мора:

$$\Delta = \sum_{\alpha=1}^n S_{\alpha}^{(p)} S_{\alpha}^{(1)} l_{\alpha} / (EF),$$

где  $S_{\alpha}^{(p)}$  — усилия в стержнях фермы от распределенной нагрузки;  $S_{\alpha}^{(1)}$  — усилие в стержне  $\alpha$  при действии единичной вертикальной силы на узел  $C$  нижнего пояса с номером  $2n + 1$ , в котором фиксируется прогиб;  $l_{\alpha}$  — длина стержня. Жесткость  $EF$  стержней одинаковая у всех стержней конструкции. В случае нагрузки на нижний пояс компоненты вектора нагрузок  $\mathbf{T}$  имеют вид:  $T_{2i} = -P, i = 2, \dots, 2n + 2$ . Последовательный расчет прогиба по этой формуле для различных чисел панелей  $n$  дает следующий результат:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 2P(31a^3 + 4c^3 + 3h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_2 &= 2P(108a^3 + 6c^3 + 5h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_3 &= 2P(257a^3 + 8c^3 + 7h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_4 &= 2P(502a^3 + 10c^3 + 9h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_5 &= 2P(867a^3 + 12c^3 + 11h^3)/(h^2EF); \dots \end{aligned}$$

Обобщение этих формул на произвольный порядок фермы дает искомую зависимость прогиба от числа панелей:

$$\Delta_n = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)/(h^2EF),$$

где  $C_1 = 8n^3 + 24n^2 + 26n + 4; C_2 = 4n + 4; C_3 = 4n + 2$ .

Численный расчет усилий в стержнях позволяет определить распределение усилий по ферме и выяснить наиболее и наименее загруженные стержни. Распределение усилий в стержнях от рассмотренной нагрузки при  $n = 2$  показано на рис. 3.

Синим цветом выделены сжатые стержни, красным — растянутые. Значения усилий при  $P = 1$  округлены до двух цифр. Главная нагрузка приходится

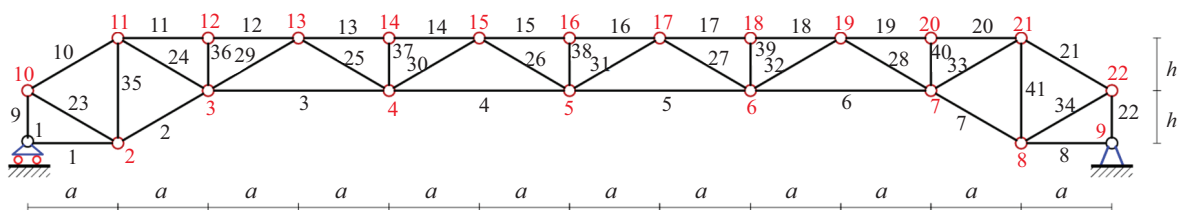


Рис. 2. Нумерация стержней и узлов,  $n = 2$

Fig. 2. Numbering of rods and nodes,  $n = 2$

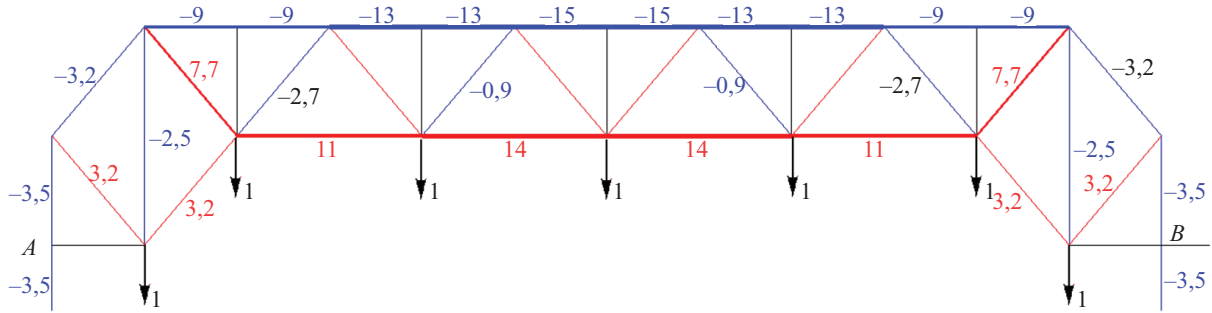


Рис. 3. Распределение усилий в стержнях,  $n = 2$

Fig. 3. Distribution of forces in rods,  $n = 2$

на пояса фермы, решетка в основном напряжена только по концам конструкции.

*Основная частота.* Расчет основной (нижней) частоты собственных колебаний механических систем с числом степеней свободы больше четырех возможен только в численной форме. Если ставить задачу получения формулы зависимости частоты колебаний регулярной структуры (фермы) от числа панелей, необходимо воспользоваться каким-то приближенным методом. Известный метод оценки частоты снизу по Донкерлею дает существенно заниженное значение частоты. Точнее и проще приближенная оценка первой частоты, рассмотренная в публикации [10]. Аналогичное упрощение для балки Эйлера – Бернулли, несущей сосредоточенную массу в произвольном месте, сделано в работе [22]. В упрощенном варианте метода Донкерлея вычисление суммы по всем узлам фермы заменяется половиной произведения значения максимального слагаемого на число степеней свободы. Это дает существенное уточнение результата и упрощение итоговой формулы. При этом, однако, теряется свойство гарантированной нижней границы частоты исходного метода Донкерлея. Формула Донкерлея имеет вид:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2}, \tag{1}$$

где  $\omega_p$  — парциальные частоты, рассчитанные для каждой массы отдельно. В исследовании [10] используется упрощение:

$$\omega_*^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = mK \delta^{\max}/2 = mK \Delta_n. \tag{2}$$

Здесь сумма вычисляется по теореме о среднем, где  $\delta^{\max}$  — максимальное значение  $\delta_p$ , вычисленное для некоторого узла, имеющего максимальный прогиб от отдельной вертикальной силы, приложенной к этому узлу. При численном расчете нет сложности вычисления суммы в выражении (1), но для аналитических преобразований разность в трудоемкости расчетов по формулам (1) и (2) значительная. По аналогии с расчетом прогиба последовательно вычисляются выражения  $\Delta_n$  для разного числа панелей:

$$\Delta_1 = (42a^3 + 5c^3 + 4h^3)/(4h^2EF);$$

$$\Delta_2 = (144a^3 + 7c^3 + 4h^3)/(4h^2EF);$$

$$\Delta_3 = (342a^3 + 9c^3 + 4h^3)/(4h^2EF);$$

$$\Delta_4 = (668a^3 + 11c^3 + 4h^3)/(4h^2EF);$$

$$\Delta_5 = (1154a^3 + 13c^3 + 4h^3)/(4h^2EF); \dots$$

В общем случае для произвольного  $n$ :

$$\Delta_n = (B_1 a^3 + B_2 c^3 + B_3 h^3)/(h^2 EF). \tag{3}$$

Коэффициенты здесь получаются методами компьютерной математики:

$$B_1 = (8n^3 + 24n^2 + 25n + 6)/6; \tag{4}$$

$$B_2 = (2n + 3)/4; B_3 = 1.$$

Таким образом, решение задачи о первой частоте имеет вид:

$$\omega_* = h \sqrt{\frac{EF}{m(6n + 10)(\Phi_1 a^3 + \Phi_2 c^3 + h^3)}}; \tag{5}$$

$$\Phi_1 = (8n^3 + 24n^2 + 25n + 6)/6; \Phi_2 = (2n + 3)/4.$$

*Вторая частота.* Знание второй собственной частоты конструкции не так актуально, как первой, основной. Однако во многих исследованиях, особенно связанных с анализом резонансных явлений, она часто бывает нужна. Для аналитического расчета второй частоты  $\omega_{**}$  собственных колебаний узлов фермы можно предложить следующий алгоритм. Пользуясь замеченным свойством подобия кривых зависимостей первой и второй частоты от порядка фермы, обнаруженным при анализе спектров частот [11–13], предположим, что для второй частоты решение также будет иметь вид (2), (3), но с дополнительными множителями  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  в (3) у коэффициентов:

$$\omega_{**}^{-2} = mK(\gamma_1 B_1 a^3 + \gamma_2 B_2 c^3 + \gamma_3 B_3 h^3)/(h^2 EF). \tag{6}$$

Для установления трех поправочных коэффициентов используем метод коллокации в трех точках. В качестве точек коллокации принимаются значения второй частоты  $\omega_{**}$ , рассчитанные численно для трех значений высоты  $h$ . Уравнение (6) записывается трижды для соответствующих значений размеров и частоты  $\omega_{**}$ . Из полученной системы трех уравнений с тремя неизвестными определяются искомые

множители  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ . Решение для второй частоты приобретает вид:

$$\omega_{**} = h \sqrt{\frac{EF}{mK(\gamma_1 B_1 a^3 + \gamma_2 B_2 c^3 + \gamma_3 B_3 h^3)}} \quad (7)$$

Для определения собственных частот использован оператор Eigenvalues вычисления собственных чисел матрицы из пакета Linear Algebra системы Maple.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Первая частота.* Рассмотрим для примера фермы из стали с модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа с площадью поперечного сечения стержней  $F = 9$  см<sup>2</sup>, массами узлов  $m = 200$  кг и с горизонтальным размером панели  $a = 3$  м. Пунктирные кривые на рис. 4 со-

ответствуют численному решению  $\omega_1$  — минимальной частоте всего спектра частот фермы, полученной в системе Maple с помощью оператора Eigenvalues.

Кривая зависимости (5) хорошо приближает численное решение снизу. С увеличением числа панелей собственная частота падает, а кривые аналитического и численного решения сближаются. Следует заметить, что использованный здесь упрощенный вариант метода Донкерлея, в отличие от оригинального метода Донкерлея, не дает гарантию оценки снизу. Теоретически кривые  $\omega_1$  и  $\omega^*$  могут пересекаться. Точность полученного приближенного аналитического решения по сравнению с численным, условно принятым за точное, так как оно получено с учетом всех степеней свободы узлов в рамках принятой модели, можно оценить по величине  $\varepsilon = |\omega^* - \omega_1|/\omega_1$  (рис. 5).

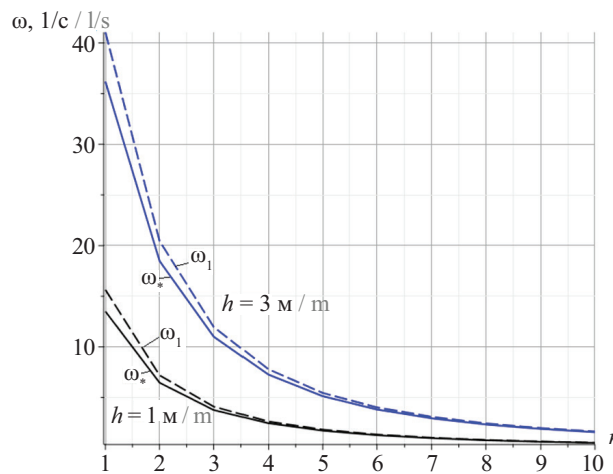


Рис. 4. Зависимость первой частоты от числа панелей, полученной двумя методами

Fig. 4. Dependence of the first frequency on the number of panels obtained by three methods

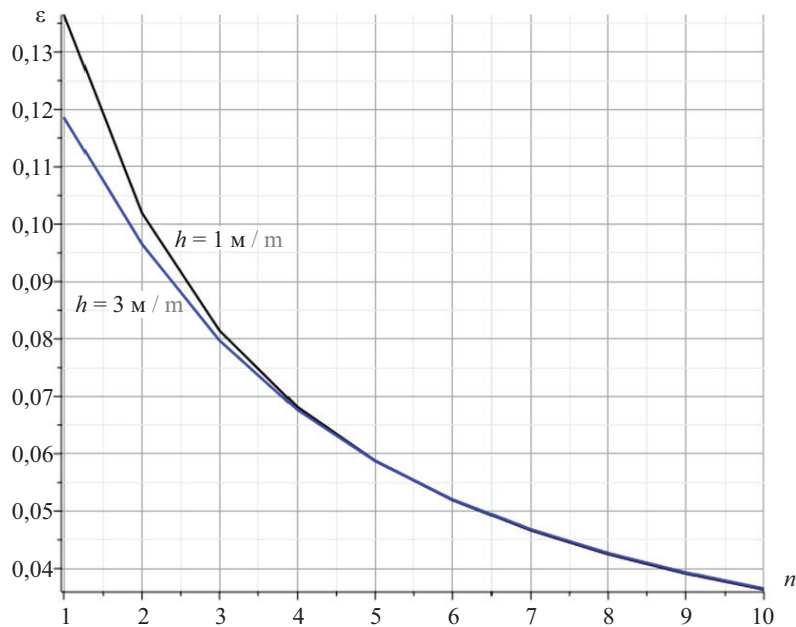


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от числа панелей,  $a = 3$  м

Fig. 5. Dependence of relative error on the number of panels,  $a = 3$  м

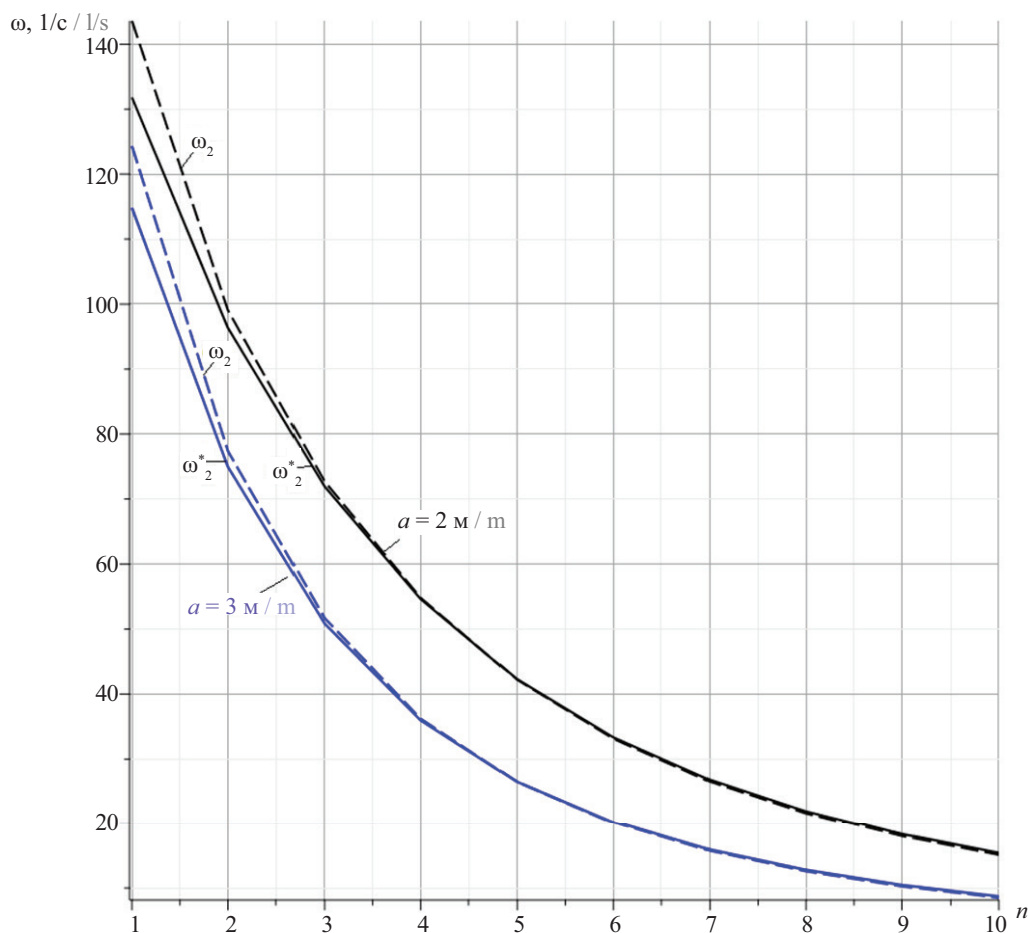


Рис. 6. Зависимость второй частоты от числа панелей

Fig. 6. Dependence of the second frequency on the number of panels

С увеличением числа панелей погрешность аналитического решения (5) падает, достигая вполне приемлемой величины в несколько процентов при  $n = 10$ . Одновременно уменьшается зависимость погрешности от высоты  $h$ . При  $n > 4$  кривые для  $h = 1$  м и  $h = 3$  м почти сливаются. Для небольшого числа панелей погрешность заметно зависит от высоты  $h$ .

Выведенную формулу (5) на практике можно использовать для оценки расчетов в сложных инженерных программах, основанных, в частности, на методе конечных элементов, и для предварительного расчета проектируемой конструкции. Наиболее эффективны формулы, полученные методом индукции, для сложных сооружений, содержащих большое число панелей. Если численный расчет сложных конструкций предполагает значительные вычислительные мощности и при этом обладает свойством неизбежного накопления погрешностей округления, то предложенная формула, напротив, независимо от порядка регулярной конструкции дает точность тем выше, чем сложнее объект.

*Вторая частота.* Для расчетов поправочных коэффициентов в формуле для второй частоты (7) по методу коллокации выбираются значения второй частоты, полученной численно для  $n = 4$  при  $a = 2$  м,

$h = 1$  м,  $h = 2$  м и  $h = 3$  м:  $\omega_1 = 13,17 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_{II} = 25,42 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_{III} = 35,43 \text{ c}^{-1}$ . Решение системы уравнений на основе уравнения (6) дает следующие безразмерные коэффициенты:  $\gamma_1 = 0,0559$ ,  $\gamma_2 = 0,1839$ ,  $\gamma_3 = 0,4552$ . Аналогично, при тех же значениях высоты и  $a = 3$  м находятся частоты  $\omega_1 = 7,207 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_{II} = 14,22 \text{ c}^{-1}$  и  $\omega_{III} = 20,75 \text{ c}^{-1}$ . Соответствующие этому размеру панели коэффициенты имеют вид  $\gamma_1 = 0,0558$ ,  $\gamma_2 = 0,1948$ ,  $\gamma_3 = 0,3975$ . Кривые зависимости второй частоты отображены на рис. 6. Расчет выполнялся для значения высоты вне области точек коллокации:  $h = 4$  м. Пунктиром выделены кривые, полученные численно. Результат показывает высокую точность найденного аналитического решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для балочной схемы статически определимой регулярной фермы найдены аналитические зависимости первой и второй собственных частот свободных колебаний. Инструментами для решения задачи являются пакет символьной математики и метод индукции. Если при нахождении решения для первой частоты применялись лишь теоретические упрощения модели и алгоритма вычислений, то для получения коэффициентов в итоговой формуле зависимости второй частоты

ты от числа панелей потребовался численный расчет этой величины для некоторых определенных значений высоты фермы. В решении для второй частоты существенно использовалось свойство подобия кривых зависимости частот различного порядка от числа панелей. Именно поэтому в качестве формы решения для второй частоты была принята формула для основ-

ной частоты с дополнительными поправочными коэффициентами. Результаты решений получились вполне приемлемыми по точности и компактности записи. Заметим, что коллокацию можно выполнять также по трем значениям размера панели или комбинациям размеров высот и панелей из области реально применимых на практике величин.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коваленко Г.В., Макеев В.Б., Дементьева В.В. Исследование частот собственных колебаний ферм на основе метода конечных элементов (МКЭ) // Молодая мысль: Наука, технологии, инновации : мат. VII (XIII) Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2015. С. 44–48. EDN WWZURN.
2. *Seventekidis P., Giagopoulos D.* Generalization gap estimation for damage classification tasks when finite element simulated data is used for training: A numerical study and experimental validation on a steel truss // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 319. P. 118855. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118855
3. *Игнатьев В.А., Игнатьев А.В.* Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : Издательство АСВ, 2022. 306 с. EDN CSOLBF.
4. *Rapp B.E.* Introduction to Maple // *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. 2017. Pp. 9–20. DOI: 10.1016/b978-1-4557-3141-1.50002-2
5. *Zotos K.* Performance comparison of Maple and Mathematica // *Applied Mathematics and Computation*. 2007. Vol. 188. Issue 2. Pp. 1426–1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008
6. *Goloskokov D.P.* Analyzing simply supported plates using maple system // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). 2014. Pp. 55–56. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893273
7. *Goloskokov D.P., Matrosov A.V.* Approximate analytical solutions in the analysis of thin elastic plates // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1959. P. 070012. DOI: 10.1063/1.5034687
8. *Matrosov A.V., Suratov V.A.* Stress-strain state in the corner points of a clamped plate under uniformly distributed normal load // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. Vol. 36. Issue 1. Pp. 124–146. DOI: 10.18720/MPM.3612018\_16. EDN ХОБЗJZ.
9. *Кирсанов М.Н.* Плоские фермы. Прогибы и частоты колебаний : справочник. М. : ИНФРА-М, 2025. 196 с. DOI: 10.12737/2173835. EDN FRTTXN.
10. *Sviridenko O.V., Komerzan E.V.* 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 СКQDPU.
11. *Льонг Конг Л.* Зависимость области резонансно безопасных частот от размеров статически определимой плоской фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2024. № 2 (41). С. 16–26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU.
12. *Луан Л.К.* Оценки прогиба и частоты собственных колебаний шарнирно-стержневой рамы с произвольным числом панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2024. № 4 (43). С. 42–53. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.004. EDN MGQUXN.
13. *Luong C.L.* Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024. No. 4 (113). P. 11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.
14. *Астахов С.В.* Аналитическая оценка прогиба стержневой модели каркаса четырехскатного покрытия // *Строительная механика и конструкции*. 2024. № 4 (43). С. 34–41. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.003. EDN GITKYF.
15. *Maslov A.N.* The first natural frequency of a planar regular truss. Analytical solution // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. No. 4 (109). P. 10912. DOI: 10.4123/CUBS.109.12. EDN QNZNZW.
16. *Комерзан Е.В., Маслов А.Н.* Оценка основной частоты колебаний Г-образной пространственной фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 35–45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP.
17. *Вычужина З.К.* Расчет значения первой частоты собственных колебаний плоской фермы с грузом // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 3 (38). С. 136–142. DOI: 10.36622/VSTU.2023.38.3.013. EDN FQOHWL.
18. *Комерзан Е.В., Ниналов И.Г., Свириденко О.В.* Расчет основной частоты собственных колебаний плоской модели составной фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 4 (39). С. 27–34. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.003. EDN DLVBCD.
19. *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. EDN GGKIPC.

20. Галишиникова В.В., Игнатъев В.А. Регулярные стержневые системы. Теория и методы расчета. Волгоград : ВолГАСУ, 2006. EDN QNMMHT.

21. Петриченко Е.А. Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // Строитель-

ная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 21–29. EDN PINHFN.

22. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses // International Journal of Mechanical Sciences. 2000. Vol. 42. Issue 7. Pp. 1287–1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

Поступила в редакцию 29 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 10 декабря 2025 г.

О Б А В Т О Р А Х : **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, IстинаResearcherID: 2939132; C216@ya.ru;

**Ольга Валерьевна Грибова** — старший преподаватель кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 6642-4984, ResearcherID: MSX-4296-2025, ORCID: 0009-0005-5209-7566; Gribovaov@mail.ru.

Вклад авторов:

Кирсанов М.Н. — идея, написание статьи, редактирование.

Грибова О.В. — теоретические преобразования, анализ, написание статьи, редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kovalenko G.V., Makeev V.B., Demytyeva V.V. Study of natural vibration frequencies of trusses based on the finite element method (FEM). *Young Thought: Science, Technology, Innovation : Proceedings of the VII (XIII) All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Postgraduates and Young Scientists*. 2015; 44-48. EDN WWZURN. (rus.).
2. Seventekidis P., Giagopoulos D. Generalization gap estimation for damage classification tasks when finite element simulated data is used for training: A numerical study and experimental validation on a steel truss. *Engineering Structures*. 2024; 319:118855. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118855
3. Ignatiev V.A., Ignatiev A.V. *Finite element method in the form of the classical mixed method of structural mechanics (theory, mathematical models and algorithms)*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 306. EDN CSOLBF. (rus.).
4. Rapp B.E. Introduction to Maple. *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. 2017; 9-20. DOI: 10.1016/b978-1-4557-3141-1.50002-2
5. Zotos K. Performance comparison of Maple and Mathematica. *Applied Mathematics and Computation*. 2007; 188(2):1426-1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008
6. Goloskokov D.P. Analyzing simply supported plates using maple system. *2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA)*. 2014; 55-56. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893273
7. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical solutions in the analysis of thin elastic plates. *AIP Conference Proceedings*. 2018; 1959:070012. DOI: 10.1063/1.5034687
8. Matrosov A.V., Suratov V.A. Stress-strain state in the corner points of a clamped plate under uniformly distributed normal load. *Materials Physics and Mechanics*. 2018; 36(1):124-146. DOI: 10.18720/MPM.3612018\_16. EDN XOBJZJ.
9. Kirsanov M.N. Planar trusses. *Deflections and oscillation frequencies : reference book*. Moscow, INFRA-M, 2025; 196. DOI: 10.12737/2173835. EDN FRITTXN. (rus.).
10. Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 3(101):10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.
11. Luong Cong L. Dependence of the region of resonance-safe frequencies on the sizes of statically determinable flat truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2024; 2(41):16-26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU. (rus.).
12. Luan L.C. Estimates of deflection and natural frequency of vibrations of a hinged-rod truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and*

*Structures*. 2024; 4(43):42-53. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.004. EDN MGQUXN. (rus.).

13. Luong C.L. Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024; 4(113):11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.

14. Astakhov S.V. Analytical assessment of the deflection of the rod model of a four-slope roof frame. *Structural Mechanics and Structures*. 2024; 4(43):34-41. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.003. EDN GITKYF. (rus.).

15. Maslov A.N. The first natural frequency of a planar regular truss. Analytical solution. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 4(109):10912. DOI: 10.4123/CUBS.109.12. EDN QNZNZW.

16. Komerzan E.V., Maslov A.N. Estimation of the L-shaped spatial truss fundamental frequency oscillations. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):35-45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP. (rus.).

17. Vychuzhina Z.K. Calculation of the flat truss natural oscillations first frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 3(38):136-142. DOI: 10.36622/VSTU.2023.38.3.013. EDN FQOHWL. (rus.).

18. Komerzan E.V., Ninalalov I.G., Sviridenko O.V. Calculation of a planar model composite truss fundamental frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 4(39):27-34. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.003. EDN DLVBCD. (rus.).

19. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuks 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. EDN GGKIPC. (rus.).

20. Galishnikova V.V., Ignatiev V.A. Regular rod systems. *Theory and calculation methods*. Volgograd, VolgGASU, 2006. EDN QNMMHT. (rus.).

21. Petrichenko E.A. Lower bound of the natural oscillation frequency of the fink truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):21-29. EDN PINHFN. (rus.).

22. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000; 42(7):1287-1305. DOI: 10.1016/s0020-7403(99)-00049-1

Received March 29, 2025.

Adopted in revised form on April 27, 2025.

Approved for publication on December 10, 2025.

**B I O N O T E S :** **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, IstitinaResearcherID: 2939132; C216@ya.ru;

**Olga V. Gribova** — senior lecturer 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: 6642-4984, ResearcherID: MSX-4296-2025, ORCID: 0009-0005-5209-7566; Gribovaov@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Mikhail N. Kirsanov — idea, article writing, editing.*

*Olga V. Gribova — theoretical transformations, analysis, article writing, editing.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.159.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206

## Цифровые методы прогнозирования осадок фундаментов

Надежда Сергеевна Никифорова, Даниил Дмитриевич Пирогов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В условиях реконструкции зданий с освоением подземного пространства контроль деформаций фундаментов имеет ключевое значение. Традиционные критерии, основанные только на величинах осадки и относительной ее неравномерности, не позволяют в полной мере учитывать пространственное распределение деформаций и взаимосвязь с инженерно-геологическими и конструктивными факторами.

**Материалы и методы.** Применена цифровая методика прогнозирования деформаций оснований реконструируемых зданий, базирующаяся на аппроксимации осадки кубическими сплайнами и последующем анализе ее производных функций (угла наклона и кривизны). Методика включает: формализацию алгоритма построения непрерывных профилей осадки и вычисления ее производных по данным геодезического мониторинга; проверку корректности методики на выборке объектов реконструкции в Москве и Санкт-Петербурге с различными параметрами котлованов, протяженностью и ориентацией стен, а также инженерно-геологическими условиями; использование методов машинного обучения (МО) для выявления связей между геометрическими параметрами котлованов, характеристиками грунтов и наблюдаемыми деформациями.

**Результаты.** Построенные поля осадки и ее производных позволили локализовать зоны максимальных деформаций между марками и зафиксировать случаи превышения предельных значений, установленных нормативами. Методы МО продемонстрировали возможность прогнозирования параметров деформаций ( $C'$ ,  $D'$ ) по внешним данным о геометрии и грунтовых характеристиках, обеспечив приемлемую точность на ограниченной выборке.

**Выводы.** Применение кубической сплайн-аппроксимации осадок основания, реконструируемых с устройством подземной части зданий и вычисления углов наклона и кривизны подошвы фундамента, расширяет традиционный инструментальный анализ, позволяя выявлять локальные зоны деформаций, недоступные при линейном приближении. Интеграция с алгоритмами МО открывает перспективу использования методики для прогноза поведения оснований в новых проектах реконструкции с освоением подземного пространства в условиях плотной городской застройки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** осадка, угол наклона, кривизна подошвы фундамента, реконструкция зданий, кубическая сплайн-аппроксимация, машинное обучение, прогноз деформаций, информационное моделирование (BIM), подземное строительство

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Никифорова Н.С., Пирогов Д.Д. Цифровые методы прогнозирования осадок фундаментов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 195–206. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206

Автор, ответственный за переписку: Даниил Дмитриевич Пирогов, daniel2000mail@mail.ru.

## Digital methods for predicting foundation settlements

Nadezhda S. Nikiforova, Daniil D. Pirogov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** In the context of building reconstruction with underground space development, monitoring foundation deformations is of critical importance. Traditional criteria based solely on settlement magnitudes and their relative non-uniformity do not fully capture the spatial distribution of deformations and their correlation with geotechnical and structural factors.

**Materials and methods.** A digital methodology for predicting deformations of the foundations of reconstructed buildings was applied, based on the approximation of settlement by cubic splines and subsequent analysis of its derivative functions (angle of inclination and curvature). The methodology includes: formalization of the algorithm for constructing continuous settlement profiles and calculating their derivatives from geodetic monitoring data; validation of the methodology using case studies of reconstruction projects in Moscow and St. Petersburg with varying excavation parameters, wall lengths and orientations, as well as geotechnical conditions; application of machine learning methods to identify relationships between excavation geometry, soil parameters, and observed deformations.

**Results.** The constructed fields of settlement and its derivatives made it possible to localize zones of maximum deformations between benchmarks and to record cases of exceeding normative threshold values. Machine learning methods demonstrated the ability to predict deformation parameters ( $C'$ ,  $D'$ ) from external data on geometry and soil properties, providing acceptable accuracy on a limited dataset.

**Conclusions.** The application of cubic spline approximation of settlements in reconstructed buildings with underground parts, along with the calculation of slope and curvature of the foundation base, expands the traditional analysis toolkit,

enabling identification of local deformation zones inaccessible to linear approximation. Integration with machine learning algorithms offers prospects for predicting foundation behavior in new reconstruction projects with underground development under dense urban conditions.

**KEYWORDS:** settlement, slope, foundation curvature, building reconstruction, cubic spline approximation, machine learning, deformation prediction, Building Information Modelling (BIM), underground construction

**FOR CITATION:** Nikiforova N.S., Pirogov D.D. Digital methods for predicting foundation settlements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):195-206. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206 (rus.).

*Corresponding author:* Daniil D. Pirogov, daniel2000mail@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Контроль деформаций фундаментов при реконструкции с освоением подземного пространства остается одной из ключевых задач геотехники, поскольку углубление котлованов, изменение схемы восприятия нагрузок зданий приводят к перераспределению напряжений и росту дополнительных деформаций. При этом не всегда есть возможность измерить осадки, например, во внутренних помещениях, в том числе по причине отсутствия доступа.

В практике оценки состояния основания здания используются установленные предельные показатели — максимальная осадка и относительная разность осадок, регламентируемые действующими нормативными документами<sup>1</sup>. Однако опыт реконструкции исторических объектов показывает, что пространственная картина деформаций формируется под воздействием совокупности факторов, таких как этажность, этапность производства работ, неоднородность основания и конструктивные особенности фундаментов. Поэтому для корректной диагностики требуется более детализированное описание деформаций, чем то, которое обеспечивают точечные измерения. Дополнительную сложность создает то обстоятельство, что не всегда представляется возможным организовать мониторинг во внутренних помещениях, что ограничивает полноту данных наблюдений<sup>2</sup>.

В качестве критериев дополнительных деформаций оснований вышеуказанные документы предлагают максимальную осадку, относительную разность осадок и крен. В частности, табл. 13.19 из Справочника геотехника и табл. Ж1 из ГОСТ Р 56198–2014 дополнительно вводят такой параметр, как кривизна подошвы фундамента. Кроме того, разность углов наклона

подошвы фундамента также рассматривается как критерий дополнительных деформаций в табл. 13.19, что согласуется с пунктом Л3 Приложения Л СП 22.13330.2016 (с Изменениями 1–5), в котором указывается, что «при геотехническом мониторинге сооружений окружающей застройки... допускается проводить фиксацию иных контролируемых параметров... в том числе дополнительную разность углов наклона подошвы фундамента и др...».

В ряде исследований предложено расширять систему оценки деформаций за счет новых показателей. Так, В.А. Ильичев, П.А. Коновалов и Н.С. Никифорова отмечают необходимость применения кривизны подошвы фундамента и разности углов наклона как дополнительных критериев [1, 2]. Эти параметры позволяют выявлять локальные концентрации деформаций, которые не фиксируются при классическом анализе только по осадкам. Одновременно говорится о том, что «живучесть» исторических зданий во многих случаях превышает нормативные пределы по относительной неравномерности осадок, что подчеркивает В.А. Шашкин [3–5].

С развитием информационного моделирования в строительстве появилась возможность рассматривать геотехнические данные не изолированно, а как часть общей цифровой среды. Включение параметров грунтов и оснований в BIM-модели позволяет обеспечить их доступность для всех участников проекта, связать результаты мониторинга с атрибутами конструктивных элементов и использовать алгоритмы анализа сведений и ИИ для выявления скрытых закономерностей [6–8]. Такой подход упрощает обмен информацией, повышает точность оценки и облегчает управление рисками в процессе реконструкции [9–11]. В международной практике показано, что BIM способен эффективно поддерживать работу с геотехнической информацией, включая прогноз деформаций и контроль устойчивости [12, 13].

В предлагаемой работе рассмотрен цифровой метод анализа, который переводит дискретные наблюдения по нивелирным маркам в непрерывные поля характеристик. Для этого выполняется построение замкнутых кривых осадки по контурам на основе кубических сплайнов и восстановление поперечных профилей с последующей аппроксимацией полиномом третьей степени. Такой подход дает возможность, помимо традиционных показателей ( $s$  и  $\Delta s/\Delta x$ ), рассчитывать локальный угол наклона  $\theta$

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*. М. : Минстрой России, 2016; ТСН 50-302–2004. Санкт-Петербург. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. СПб. : Правительство Санкт-Петербурга, 2004; ГОСТ Р 56198–2014. Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования. М. : Стан-дартинформ, 2019.

<sup>2</sup> Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. 3-е изд., доп. и перераб. / под ред. В.А. Ильичёва, Р.М. Мангушева. М. : АСВ, 2023. 1084 с.

и кривизну  $\rho$  как дополнительные диагностические функции.

Визуализация результатов реализуется в цифровой среде программирования, где поля характеристик отображаются в плане и перспективе с градиентным кодированием зон «норма/превышение». Такой формат облегчает локализацию проблемных участков и формирует основу для интеграции данных мониторинга в цифровые модели реконструируемых объектов.

Цель исследования — разработка и апробация цифровой методики прогнозирования деформаций оснований реконструируемых зданий на основе аппроксимации осадки кубическими сплайнами и анализа производных функций (угла наклона и кривизны).

Для реализации цели были поставлены задачи:

- формализовать алгоритм построения сплайн-кривых осадки по данным геодезических наблюдений;
- реализовать вычисление производных функций  $\theta$  и  $\rho$  и сопоставление их с нормативными предельными значениями;
- выполнить визуализацию полученных полей осадки и производных характеристик для выявления локальных зон превышений;
- прогнозировать осадку зданий при реконструкции здания с устройством подземной части, используя параметры линейной аппроксимации ( $C$ ,  $D'$ ) в моделях машинного обучения (МО) (Lasso, Ridge, ElasticNet), что позволяет учесть параметры реконструируемых зданий и характеристики грунта.

Современные исследования подтверждают эффективность интеграции алгоритмов МО и цифровых моделей в геотехнике, включая интерполяцию свойств грунтов [14–16], а также использование physics-informed моделей для прогноза деформаций и устойчивости [17–19]. Интеграция этих методов с BIM-средой дополнительно облегчает визуализацию и обмен данными [20–22].

Необходимость такого подхода связана с ограниченностью общепринятого метода визуализации деформации оснований, который оперирует только отдельными точками измерений и не отражает реальный характер их распределения между точками наблюдения. Сплайн-аппроксимация деформации оснований переводит дискретные данные измерений в непрерывные функции, а использование алгоритмов МО дает возможность прогнозировать деформации оснований.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования анализировались здания и сооружения, реконструируемые с освоением подземного пространства в условиях плотной исторической застройки, усиление фундаментов которых осуществлялось буронагреционными сваями.

Рассматривались:

- здание Старого Гостиного двора (далее — СГД) в Москве, реконструкция которого подробно описана в ряде публикаций по геомониторингу<sup>3, 4, 5</sup>;
- реконструкция дома Несвицкой, расположенного на Смоленской-Сенной площади в Москве, сведения о реконструкции и мониторинге приведены в соответствующих материалах<sup>6, 7</sup>;
- комплекс «Неглинная плаза», ограниченный ул. Рождественка, ул. Неглинная, Кисельным пер., Трубной пл. в Москве<sup>8, 9</sup>;
- комплекс зданий, расположенных на углу Херсонской и Исполкомской улиц в центре Санкт-Петербурга (Геотехнический мониторинг, ул. Херсонская д. № 12, 2011 г., ООО «Центр геотехнического мониторинга»).

Исходные данные осадок включали результаты геодезического мониторинга и инженерно-геологических изысканий. Для каждого объекта фиксировались геометрические параметры: глубина котлована  $H_k$ ; длина исследуемого поперечного профиля фундамента  $R$ ; расстояние от котлована до ближайшей стены реконструируемого здания  $L$ ; ориентация стены по отношению к котловану  $\sin(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол между стеной и ограждением котлована. Дополнительно учитывались характеристики грунтового массива: сцепление  $c$ ; угол внутреннего трения  $\varphi$  и модуль деформации  $E$ , а также максимальное

<sup>3</sup> Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Бахолдин Б.В., Никифорова Н.С. Реконструкция фундаментов здания Старого Гостиного Двора в Москве и сопровождающий ее мониторинг // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 4–5. С. 43–46.

<sup>4</sup> Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Геомониторинг как составная часть мероприятий по обеспечению безопасности исторической застройки (на примере реконструкции Старого Гостиного Двора в Москве) // Гуманизм и строительство на пороге третьего тысячелетия : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. С. 27–28.

<sup>5</sup> Коновалов П.А., Коновалов В.П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 5-е изд. М. : АСВ, 2011. 384 с.

<sup>6</sup> Никифорова Н.С., Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф. Геотехнические проблемы при строительстве уникальных объектов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 5. С. 2–8.

<sup>7</sup> Никифорова Н.С., Зехниев Ф.Ф., Астафьев С.В., Буртовая О.В. Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания // Вестник гражданских инженеров. СПб., 2009. № 2 (19). С. 126–130.

<sup>8</sup> Ильичёв В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 17–20.

<sup>9</sup> Никифорова Н.С. Обеспечение сохранности зданий в зоне влияния подземного строительства. 2-е изд. М. : МИСИ – МГСУ, 2016. 154 с.

Исходные данные исследуемых объектов реконструкции

Initial data of the studied reconstruction objects

Объект Object	$H_k$ , м / m	$c$ , кПа / kPa	$\varphi$ , °	$E$ , МПа / MPa	$\text{Sin}(\alpha)$	$P_{\max}$ , кПа / kPa	$P_{\min}$ , кПа / kPa
СГД OGD	4,6	2	30	35	0,84–1	512–418	481–407
Несвицкая Nesvitskaya	11,5	25	20	29	1	570	360
Неглинная Neglinnaya	11; 21	20	13	10	1	945–308	550–238
СПб SPb	9,9	20	23	20	0,87–1	310	310

и минимальное давление по подошве фундамента на исследуемом участке здания после реконструкции ( $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ ). Совокупность этих параметров определяет условия формирования осадок и их распределение вдоль контура здания. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры (таблица).

Для восстановления профиля осадки использовалась интерполяция кубическими полиномами. Такой подход позволяет построить непрерывную функцию осадки и определить ее производные: угол наклона подошвы фундамента и кривизну. На основе этих значений формировались эпюры, отражающие характер деформаций в пределах изучаемых участков. Методика обоснована необходимостью выявления опасных зон и сопоставления полученных значений с нормативными предельными критериями.

Техническая реализация выполнена в среде Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib, что предоставляет возможность автоматизированной обработки данных и построения графиков.

Выбор этого метода обусловлен его универсальностью: он применим при ограниченном числе наблюдений, обеспечивает плавное восстановление осадок между точками замеров и позволяет корректно учитывать сочетание геометрических и геотехнических факторов, характерное для реконструкции в стесненных условиях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В практике геотехнического мониторинга осадки зданий фиксируются по отдельным маркам, и для их наглядного представления обычно строится эпюра — точки соединяются прямыми линиями. Такой классический подход прост и понятен, но имеет очевидный недостаток: профиль получается угловатым, что не отражает плавного характера распространения осадки основания между точками наблюдений. В результате теряется часть информации о том, как реально развиваются деформации на участке между марками.

В настоящем исследовании для преодоления этого ограничения применяется метод кубической сплайн-интерполяции. Его суть заключается в том, что через все измеренные точки проводится не набор прямых, а единая сплаженная кривая, которая согласуется с каждым значением наблюдений. В отличие от полилинии (прямых отрезков, соединенных концами друг с другом), сплайн позволяет корректно восстанавливать плавные изменения осадки, исключая резкие «изломы», не имеющие физического смысла.

Преимущество такого подхода состоит в том, что становится возможным анализировать не только абсолютные значения осадок в точках наблюдений, но и их распределение вдоль всего рассматриваемого контура реконструируемого здания. Для анализа выбранных зданий строились непрерывные кривые осадки, аппроксимирующие значения по нивелирным маркам. В качестве аппроксимирующей функции применялся кубический сплайн — кусочный полином третьей степени, определяемый отдельно на каждом интервале между соседними марками. Для интервала  $[x_i, x_{i+1}]$ , где  $h_i = x_{i+1} - x_i$ , сплайн имеет вид:

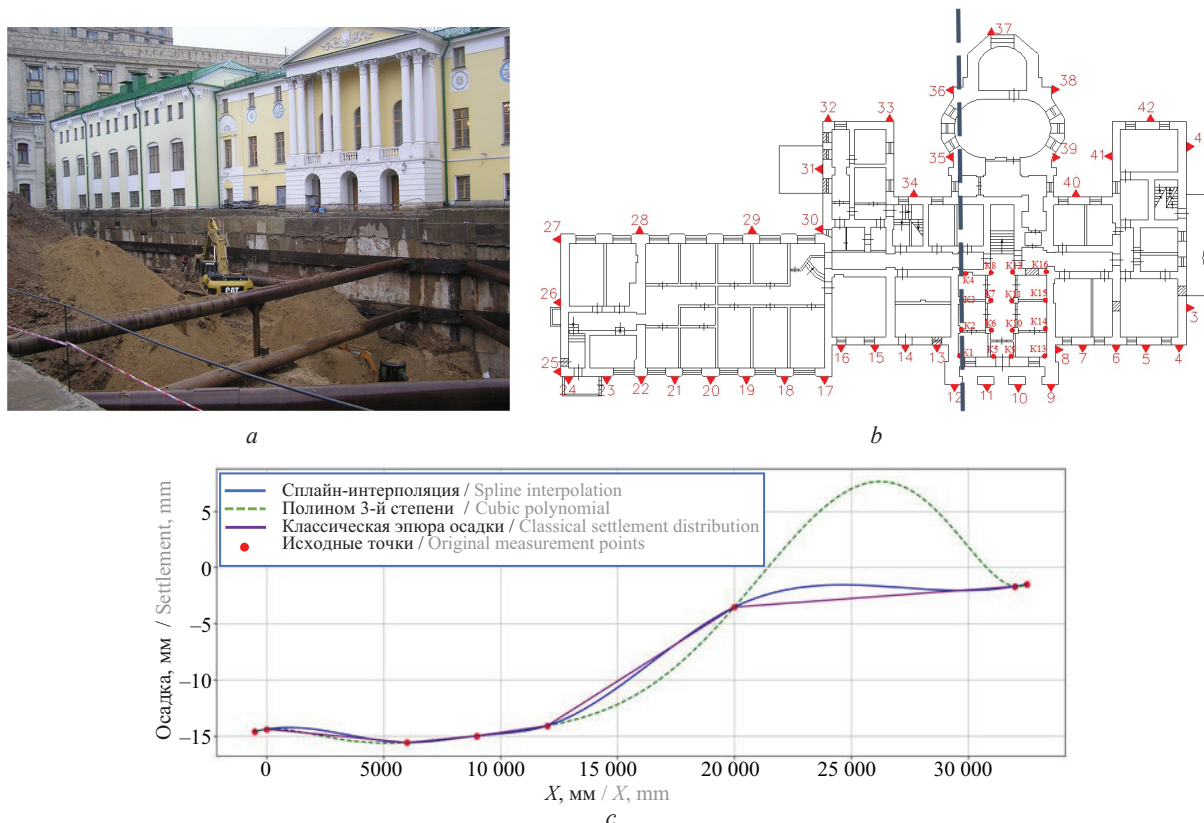
$$s(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i,$$

где коэффициенты ( $a_i, b_i, c_i, d_i$ ) определяются из условий интерполяции и гладкости.

На рис. 1 показан пример построения кривой осадки вдоль фасада по данным нивелирных марок. Непрерывные сплайны отображают плавное распределение осадок вдоль периметра и служат исходной основой для дальнейшего анализа деформаций.

Для восстановления поперечного профиля осадки поперечных стен (между внутренним и внешним контурами) используется метод четырех диаграмм, если нет данных измерений осадок. В каждом разрезе фиксируется пара центральных марок — одна на внутреннем контуре и соответствующая ей на внешнем. Дополнительно учитываются соседние точки этих марок, что позволяет построить четыре альтернативные аппроксимации поперечного профиля.

Все варианты строятся по одному принципу: центральные марки внутреннего и внешнего контура остаются общими, а в качестве дополнительных



**Рис. 1.** Исторический памятник — дом А.И. Несвицкой: *a* — освоение подземного пространства; *b* — схема расположения геодезических марок на плане; *c* — сравнение способов отображения профиля осадки на примере разреза от марки 11 до марки 37: классическая эпюра (линии между исходными точками), аппроксимация полиномом третьей степени и кубическая сплайн-интерполяция. Красные точки — результаты наблюдений

**Fig. 1.** Historical monument — A.I. Nesvitskaya House: *a* — development of underground space; *b* — layout of geodetic benchmarks on the plan; *c* — comparison of settlement profile representation methods on the example of the section from benchmark 11 to benchmark 37: classical diagram (lines between initial points), third-degree polynomial approximation, and cubic spline interpolation. Red dots — monitoring results

опорных точек берутся соседние точки слева и справа. В итоге формируются четыре комбинации, каждая из которых дает собственный сплайновый профиль.

Полученные линии затем усредняются, и в качестве итогового принимается участок, ограниченный центральными марками внутреннего и внешнего контуров. Подход, проиллюстрированный на рис. 2, позволяет сгладить случайные ошибки отдельных точек. Усредненный профиль применяется для дальнейшей аппроксимации осадок полиномом третьей степени.

Поперечный профиль осадки, полученный усреднением четырех диаграмм, аппроксимируется полиномом третьей степени. Полином имеет вид:

$$s(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d.$$

Таким образом, аналитическая аппроксимация в виде полинома третьей степени позволяет перейти от дискретных разрезов к формированию непрерывного поля осадок по всему периметру здания. На изображении хорошо просматриваются промежуточные значения между марками, что дает возможность оценивать распределение деформаций

не только в отдельных точках, но и вдоль всего фундамента.

На рис. 3 приведены профили осадки для всей выборки объектов реконструкции. Каждая линия соответствует отдельному случаю наблюдений, при этом различные типы штриховок отображают группы зданий с разными значениями физико-механических характеристик грунтов, нагрузками на фундамент и глубиной котлована.

На этом этапе выполнено сопоставление результатов с нормативными предельными деформациями. В соответствии с табл. Е.1 предельные дополнительные деформации для реконструируемых сооружений СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» для многоэтажных бескаркасных зданий из кирпича или крупных блоков, относящихся к III категории технического состояния, предельная дополнительная осадка принимается равной 30 мм. Данное значение использовано в качестве контрольного уровня на графиках (горизонтальная красная линия). Такая форма представления позволяет определить зоны, требующие усиления.

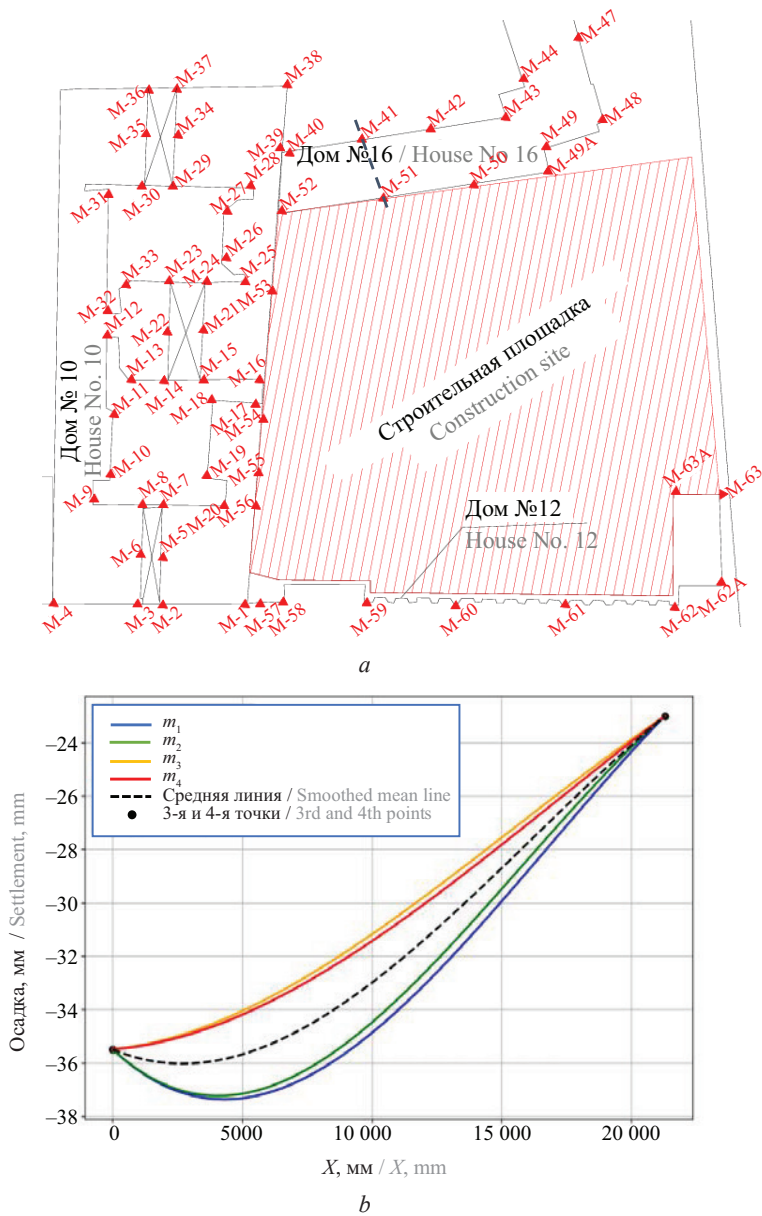


Рис. 2. Здание, расположенное по адресу ул. Исполкомская, д. 16 в Санкт-Петербурге: *a* — схема расположения геодезических марок на плане; *b* — построение поперечного профиля осадки методом четырех диаграмм на примере разреза от марки 51 до марки 41

Fig. 2. Building located at 16 Ispolkomskaya Street, St. Petersburg: *a* — layout of geodetic benchmarks on the plan; *b* — construction of the transverse settlement profile using the four-diagram method on the example of the section from benchmark 50 to benchmark 41

В геотехнической практике основным параметром служит осадка, а угол наклона оценивается косвенно как отношение приращения осадки к длине отрезка, т.е. через показатель  $\frac{\Delta s}{\Delta x}$ :

$$\frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{s(x + \Delta x) - s(x)}{\Delta x}$$

Такая величина отражает средний уклон на базе, но не позволяет задать его как функцию, определенную в каждой точке. Использование аппроксимации кубическим полиномом дает возможность ввести локальный угол наклона, обозначаемый символом  $\theta$ ,

который вычисляется как первая производная функции осадки:

$$\theta(x) = 3ax^2 + 2bx + c.$$

Тем самым угол наклона рассматривается не как усредненная характеристика, а как непрерывная функция, позволяющая анализировать распределение уклонов вдоль всего профиля.

На рис. 4 показано распределение углов наклона для поперечных стен зданий. Превышение нормативного предела, установленного СП 22.13330.2016 0,0012 рад, выявлено только на 7 поперечных стенах реконструируемых зданий.

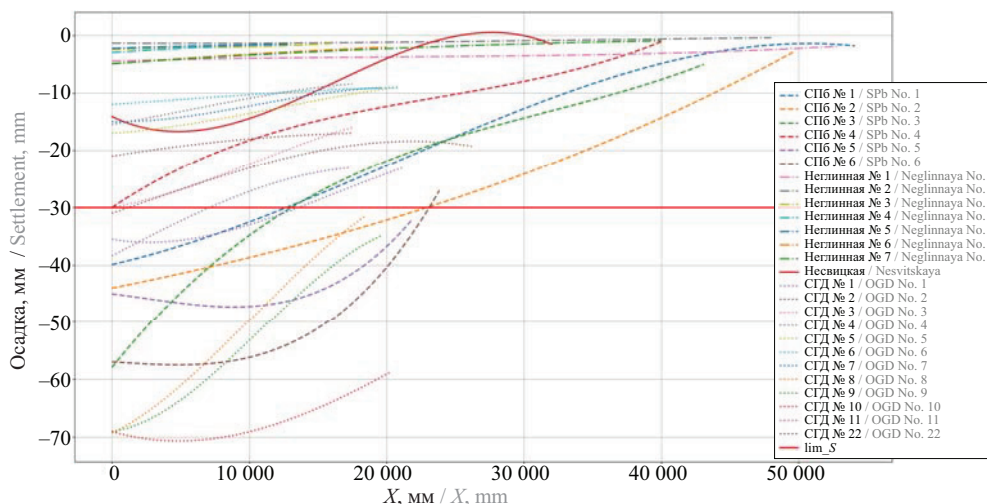


Рис. 3. Графики распределения осадки  $S(x)$  для поперечных стен, где 0 — ближайшая к котловану точка  
 Fig. 3. Settlement distribution curves  $S(x)$  for transverse walls, where 0 is the point closest to the excavation

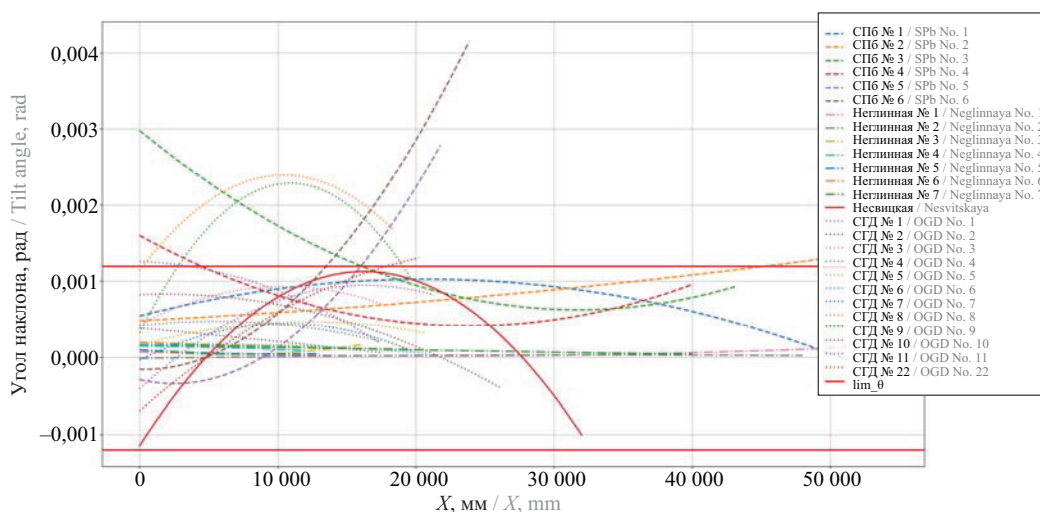


Рис. 4. Графики распределения угла наклона подошвы фундаментов  $\theta(x)$  для выборки объектов реконструкции  
 Fig. 4. Distribution curves of foundation tilt angle  $\theta(x)$  for the specimen of reconstruction objects

Поскольку функция угла наклона  $\theta(x)$  получена в аналитическом виде, становится возможным вычислить и кривизну профиля, которая обозначается символом  $\rho$  и соответствует второй производной функции осадки:

$$\rho(x) = 6ax + 2b.$$

Предлагаемая методика расширяет традиционный набор показателей: к осадке  $s(x)$  и относительной разности осадок  $\Delta s/\Delta x$  добавляются непрерывные функции угла наклона  $\theta(x)$  и кривизны  $\rho(x)$ , согласно требованиям ГОСТ Р 56198–2014. Этот подход позволяет детальнее прогнозировать деформации основания реконструируемых памятников и формировать основу для цифрового анализа и визуализации.

На рис. 5 представлено распределение кривизны для поперечных стен зданий. В качестве ориентировочного предельного уровня принято значение

$10 \cdot 10^{-8}$  1/мм, которое при практически применении подлежит адаптации в зависимости от категории технического состояния здания по СП 22.13330.2016. Превышения зафиксированы только на семи поперечных стенах реконструируемых зданий.

Задача прогнозирования деформаций оснований при реконструкции осложняется тем, что полные ряды наблюдений по геотехническим объектам собираются редко, а доступные данные зачастую фрагментарны. В таких условиях классические эмпирические зависимости и аналитические решения не всегда позволяют достоверно описать развитие осадок. Для преодоления этого ограничения предложено использовать методы машинного обучения, которые способны выявлять скрытые связи между геометрическими параметрами сооружения, инженерно-геологическими характеристиками грунтов и наблюдаемыми деформациями основания.

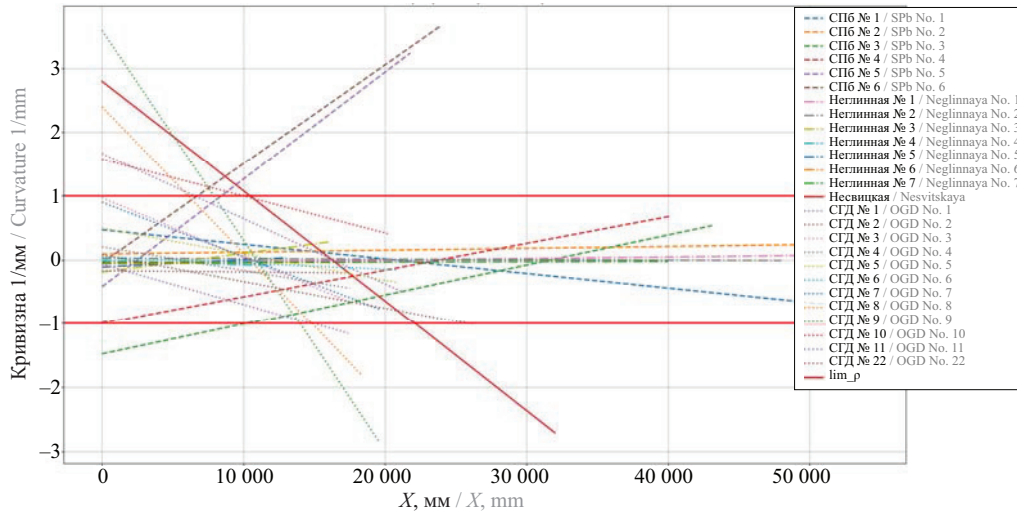


Рис. 5. Графики распределения кривизны  $\rho(x)$  для выборки объектов реконструкции

Fig. 5. Distribution curves of foundation base curvature  $\rho(x)$  for the specimen of reconstruction objects

Для прогноза осадок реконструируемого здания принята упрощенная аппроксимация в виде полинома первой степени:

$$S(x) = C'x + D',$$

где коэффициент  $C'$  отражает наклон профиля осадки вдоль стены, а коэффициент  $D'$  задает базис смещения по вертикали;  $x$  — координата точки на фундаменте ( $x = 0$  у котлована) по поперечной стене здания. Линейная форма выбрана потому, что она проще в обучении и позволяет уловить базовые зависимости даже на небольшой выборке. В дальнейшем по мере накопления сведений модель может быть расширена до полинома более высокого порядка с учетом кривизны подошвы фундамента.

С целью аппроксимации связей применены линейные модели с регуляризацией Lasso, Ridge и ElasticNet. Эти методы различаются способом борьбы с переобучением: Lasso «обнуляет» мало-значимые параметры, Ridge равномерно сглаживает вклад всех факторов, а ElasticNet сочетает оба подхода. В инженерном понимании это значит, что алгоритмы по-разному выделяют главные влияющие факторы: Lasso оставляет только наиболее значимые (например, угол поворота стены или модуль деформации грунта); Ridge распределяет влияние между всеми параметрами; а ElasticNet дает промежуточное, более сбалансированное решение.

Результаты анализа показали, что коэффициент  $C'$ , характеризующий угол наклона линии осадки, в наибольшей степени зависит от ориентации стены относительно котлована  $\sin(\alpha)$ . Дополнительно заметное влияние оказывают угол внутреннего трения грунта  $\varphi$  и модуль деформации  $E$ , однако их вклад выражен слабее и не столь однозначен. Геометрические параметры конструкции — расстояние от котлована до ближайшего торца стены  $L$ , глубина котлована  $H_k$  и длина стены  $R$  — практи-

чески не влияют на значение  $C'$ . Ниже приведены формулы осадки, полученные каждой моделью:

$$S_{Ridge} = \left( 2,2 \cdot 10^{-3} \sin \alpha - 4,3 \cdot 10^{-9} L \frac{1}{m} - 2,2 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - 5,0 \cdot 10^{-9} R \frac{1}{m} + 4,3 \cdot 10^{-6} c \frac{1}{\text{kPa}} + 5,0 \cdot 10^{-5} \varphi \frac{1}{1^\circ} - 4,7 \cdot 10^{-5} E \frac{1}{\text{MPa}} - 1,2 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 6,0 \cdot 10^{-7} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 1,3 \cdot 10^{-3} \right) x + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 9,9 \cdot 10^{-4} H_k \frac{1}{m} + 3,9 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} - 4,9 \cdot 10^{-2} c \frac{1}{\text{kPa}} - 2,4 \varphi \frac{1}{1^\circ} + 2,3 E \frac{1}{\text{MPa}} + 1,4 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 56;$$

$$S_{Lasso} = \left( 2,2 \cdot 10^{-3} \sin \alpha - 3,0 \cdot 10^{-9} L \frac{1}{m} - 2,5 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - 4,1 \cdot 10^{-9} R \frac{1}{m} + 3,0 \cdot 10^{-5} \varphi \frac{1}{1^\circ} - 4,2 \cdot 10^{-5} E \frac{1}{\text{MPa}} - 2,4 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 7,0 \cdot 10^{-7} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 8,2 \cdot 10^{-4} \right) x + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 1,7 \cdot 10^{-3} H_k \frac{1}{m} + 3,9 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} + 0,87 c \frac{1}{\text{kPa}} + 8,8 \cdot 10^{-2} \varphi \frac{1}{1^\circ} +$$

$$\begin{aligned}
& + 2,5E \frac{1}{\text{МПа}} + 1,4 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - \\
& - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 140; \\
S_{\text{ElasticNet}} = & \left( 4,6 \cdot 10^{-4} \sin \alpha - 1,3 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - \right. \\
& \left. - 1,5 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 4,2 \cdot 10^{-4} \right) x + \\
& + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 1,1 \cdot 10^{-3} H_k \frac{1}{m} + \\
& + 3,8 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} + 6,5 \cdot 10^{-2} c \frac{1}{\text{kPa}} - 2,1 \varphi \frac{1}{1^\circ} + \\
& + 2,3E \frac{1}{\text{МПа}} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - \\
& - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 66.
\end{aligned}$$

Коэффициент  $D'$ , определяющий базис смещения кривой осадки, формируется под воздействием более широкого набора факторов. Наибольшее значение здесь имеют ориентация стены  $\sin(\alpha)$ , сцепление грунта  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и модуль деформации  $E$ . Кроме того, существенный вклад вносят и геометрические характеристики: глубина котлована  $H_k$ , расстояние от стены до котлована  $L$  и длина стены  $R$ . Иными словами, величина  $D'$  отражает как физико-механические характеристики грунтов основания, так и особенности компоновки подземного сооружения.

Линейные модели позволяют выделить ключевые параметры, влияющие на осадку реконструируемого здания.

Проведенное сравнение трех моделей машинного обучения (Lasso, Ridge и Elastic Net) показало различия в точности прогнозирования коэффициента  $C'$  и сходные результаты для коэффициента  $D'$ .

Для  $C'$  наилучшие результаты продемонстрировали модели Lasso и Ridge: значения средних ошибок сопоставимы между собой. В то же время ElasticNet показал худшее качество: ошибки оказались выше.

Для коэффициента  $D'$  существенных различий между моделями не выявлено: все три алгоритма

продемонстрировали одинаковые результаты. Таким образом, на текущий момент оптимальными для описания зависимости коэффициента  $C'$  являются модели Lasso и Ridge, тогда как ElasticNet оказался наименее эффективным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика сплайн-аппроксимации показала возможность перехода от точечных геодезических наблюдений к прогнозированию осадки между марками. Построение непрерывной кривой осадки фундамента реконструируемого здания позволяет восстановить профиль деформаций по всему контуру фундамента здания, выявлять локальные участки превышений и анализировать распределение осадки не только в фиксированных точках, но и в промежутках между ними. Такой подход повышает информативность наблюдений и делает возможной оценку состояния всего контура фундамента.

Построенные профили осадки, угла наклона и кривизны показали, что именно кривизна является наиболее чувствительным параметром к изменению деформационного состояния и может рассматриваться как основной дополнительный критерий деформаций. Использование этого показателя предоставляет возможность точнее фиксировать потенциально опасные зоны, чем классическое построение полилинейных эпюр осадки по прямым линиям.

Применение методов МО (Lasso, Ridge, ElasticNet) позволило установить зависимости между коэффициентами аппроксимации и характеристиками котлована и основания: глубиной выемки, протяженностью стены, расстоянием до котлована, физико-механическими характеристиками грунтов основания, а также давлением по подошве фундамента. Это открывает возможность прогнозировать осадку реконструируемого с устройством подземной части здания.

Точность прогноза на текущем этапе ограничена из-за небольшого объема базы объектов и отсутствия ряда значимых факторов в модели. Тем не менее результаты подтверждают перспективность предложенного подхода. Дальнейшее развитие связано с расширением выборки, включением новых характеристик и уточнением математического аппарата, что позволит повысить надежность прогноза и внедрить методику в практику реконструкции зданий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Новые методы измерения деформаций зданий и критерии их оценки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. № 4. С. 8–12. EDN LLWFKS.
2. Ильичев В.А., Никифорова Н.С. Методы определения кривизны и разности углов наклона фунда-

ментов как критериев деформаций оснований зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 3. С. 14–17. EDN YNJLHV.

3. Шашкин В.А. Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 32–45. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-32-45. EDN CITCIO.

4. Шашкин В.А. Конструкция фундаментов зданий рядовой застройки XVIII – начала XIX в. (на примере г. Санкт-Петербурга) // Геотехника. 2022. Т. 14. № 3. С. 6–20. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-3-6-20. EDN GIYETQ.

5. Шашкин В.А. Обеспечение безопасности исторических зданий, получивших «сверхнормативные» деформации вследствие влияния нового строительства // Геотехника. 2024. Т. 16. № 4. С. 24–39. DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-4-24-37. EDN VQVXCE.

6. Svensson M. GeoBIM for Optimal Use of Geotechnical Data // Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting. 2016. Pp. 66–121.

7. El Sibaii M., Granja J., Bidarra L., Azenha M. Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). 2022. Vol. 27. Pp. 393–415. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.019

8. Tawelian L.R., Mickovski S.B. The implementation of geotechnical data into the BIM process // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. Pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.115.

9. Beck J., Jürgens S., Henke S. Automating stability analysis using BIM-FEA-Integration // Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024.

10. Berdigulyjov M., Popa H. The implementation and role of geotechnical data in BIM process // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 85. P. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/20198508009.

11. Разводовский Д.Е., Шулятьев С.О., Ставницер Л.П. Применение BIM в геотехнике // Жилищное строительство. 2018. № 11. С. 3–8. EDN VOFZRW.

12. Fonsati A., Cosentini R.M., Tundo C., Osello A. From Geotechnical Data to GeoBIM Models: Testing Strategies for an Ex-Industrial Site in Turin // Buildings. 2023. Vol. 13 (9). P. 2343. DOI: 10.3390/buildings13092343.

13. Liu N. et al. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction // Scientific Reports. 2023.

14. Utepov Y., Aldungarova A., Mukhamejanova A., Awwad T., Karaulov S., Makasheva I. Voxel Interpolation of Geotechnical Properties and Soil Classification Based

on Empirical Bayesian Kriging and Best-Fit Convergence Function // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 14. P. 2452. DOI: 10.3390/buildings15142452

15. Zaid R. 3D visualization of interpolating geotechnical strata in a BIM environment (Case study of Civil3D) // Misan Journal of Engineering Sciences. 2024. Vol. 5. Issue 2. Pp. 10–18.

16. Красильников В.П., Андрианов А.В., Красильников П.А., Мещерякова О.Ю. Перспективы и проблемы внедрения BIM-технологии в отечественную строительную отрасль // Геотехника. 2022. Т. 14. № 2. С. 6–17. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-2-6-17. EDN SQYXBG.

17. Yuan B., Choo C.S., Yeo L.Y., Wang Y., Yang Z., Guan Q. et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper // Geomechanics and Geoengineering. 2025. Vol. 20. Issue 5. Pp. 1128–1159. DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029

18. Dahal A., Lombardo L. Towards physics-informed neural networks for landslide prediction // ArXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.06785

19. Болдырев Г.Г., Иорисов И.Х., Редин А.В., Дивеев А.А. BIM геотехника и перспективы ее развития в Российской Федерации // Геотехника. 2020. Т. 12. № 4. С. 6–22. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-6-22. EDN VRURKI.

20. Satyanaga A., Aventian G.D., Makenova Y., Zhakiyeva A., Kamaliyeva Z., Moon S.W. et al. Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering // Infrastructures. 2023. Vol. 8. Issue 6. P. 103. DOI: 10.3390/infrastructures806103

21. Самосват В.В. Трехмерная цифровая модель геологической среды как ключевой элемент BIM-технологии и высшая ступень цифровизации строительства // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». 2020. № 3.

22. Кудреватых О.А., Середин В.В., Андрианов А.В., Красильников В.П. К вопросу о выборе программного обеспечения для создания BIM в инженерной геологии // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023. № 1. С. 283–296.

Поступила в редакцию 20 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никифорова — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5504-0887, РИНЦ ID: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Даниил Дмитриевич Пирогов — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; daniel2000mail@mail.ru.

Вклад авторов:

Никифорова Н.С. — научное руководство, постановка задачи, редактирование текста.

Пирогов Д.Д. — сбор и обработка материалов, математическая обработка данных, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Il'ichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. New methods of measuring building deformations and criteria for their estimation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 4:8-12. EDN LLWFKS. (rus.).
2. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S. Methods for the determination of curvatures and the difference between the slopes of foundations as the criteria of deformation of the basements of buildings and structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 3:14-17. EDN YNJLHV. (rus.).
3. Shashkin V.A. Accumulated deformations of the historical development of St. Petersburg. *Housing Construction*. 2023; 12:32-45. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-32-45. EDN CITCIO. (rus.).
4. Shashkin V.A. Construction of foundations of range buildings in the XVIII – early XIX century (by example of Saint Petersburg). *Geotechnics*. 2022; 14(3):6-20. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-3-6-20. EDN GIYETQ. (rus.).
5. Shashkin V.A. Provision of safety of historical buildings subjected to “excess” deformations caused by new construction. *Geotechnics*. 2024; 16(4):24-39. DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-4-24-37. EDN VQVXCE. (rus.).
6. Svensson M.. GeoBIM for optimal use of geotechnical data. *Proceedings of the Nordic Geotechnical Meeting (NGM)*. 2016; 66-121.
7. El Sibaii M., Granja J., Bidarra L., Azenha M. Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations // *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2022. Vol. 27. Pp. 393–415. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.019.
8. Tawelian L.R., Mickovski S.B. The implementation of geotechnical data into the BIM process. *Procedia Engineering*. 2016; Vol. 143. Pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.115.
9. Beck J., Jürgens S., Henke S. Automating stability analysis using BIM-FEA-Integration // *Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024*.
10. Berdigylyjov M., Popa H. The implementation and role of geotechnical data in BIM process // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 85. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/20198508009
11. Razvodovsky D.E., Shulyatiev S.O., Stavnitser L.R. The use of BIM in geotechnics. *Housing Construction*. 2018; 11:3-8. EDN VOFZRW. (rus.).
12. Fonsati A., Cosentini R.M., Tundo C., Osello A. From Geotechnical Data to GeoBIM Models: Testing Strategies for an Ex-Industrial Site in Turin. *Buildings*. 2023. Vol. 13(9). Article 2343. DOI: 10.3390/buildings13092343.
13. Liu N. et al. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction // *Scientific Reports*. 2023.
14. Uteпов Y., Aldungarova A., Mukhamejanova A., Awwad T., Karaulov S., Makasheva I. Voxel Interpolation of Geotechnical Properties and Soil Classification Based on Empirical Bayesian Kriging and Best-Fit Convergence Function. *Buildings*. 2025; 15(14):2452. DOI: 10.3390/buildings15142452
15. Zaid R. 3D visualization of interpolating geotechnical strata in a BIM environment (Case study of Civil3D). *Misan Journal of Engineering Sciences*. 2024; 5(2):10-18.
16. Krasilnikov V.P., Andrianov A.V., Krasilnikov P.A., Meshcheriakova O.Yu. Prospects and problems of introducing BIM technology in the domestic construction industry. *Geotechnics*. 2022; 14(2):6-17. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-2-6-17. EDN SQYXBG. (rus.).
17. Yuan B., Choo C.S., Yeo L.Y., Wang Y., Yang Z., Guan Q. et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper. *Geomechanics and Geoengineering*. 2025; 20(5):1128-1159. DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029
18. Dahal A., Lombardo L. Towards physics-informed neural networks for landslide prediction. *ArXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.06785
19. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh., Redin A.V., Diveev A.A. BIM geotechnics and perspectives of its development in the Russian Federation. *Geotechnics*. 2020; 12(4):6-22. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-6-22. EDN VRURKI. (rus.).
20. Satyanaga A., Aventian G.D., Makenova Y., Zhakiyeva A., Kamaliyeva Z., Moon S.W. et al. Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering. *Infrastructures*. 2023; 8(6):103. DOI: 10.3390/infrastructures8060103
21. Samosvat V.V. Three-dimensional digital model of the geological environment as a key element of BIM technology and the highest stage of construction digitalization. *Independent electronic journal “GeoInfo”*. 2020; (3). (rus.).
22. Kudrevatykh O.A., Seregin V.V., Andrianov A.V., Krasilnikov V.P. On the selection of software for creating BIM in engineering geology. Proceedings of Tula State University. *Earth Sciences*. 2023; 1:283-296. (rus.).

Received October 20, 2025.

Adopted in revised form on November 17, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

**B I O N O T E S:** **Nadezhda S. Nikiforova** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5504-0887, ID RSCI: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

**Daniil D. Pirogov** — postgraduate student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; daniel2000mail@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Nadezhda S. Nikiforova — scientific supervision, problem statement, text editing.*

*Daniil D. Pirogov — data collection and processing, mathematical analysis, manuscript writing.*

*The authors declare no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 534.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.207-218

## Гармонические продольные волны в дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях

Сергей Гургенович Саиян<sup>1,2</sup>, Анастасия Андреевна Марасанова<sup>1</sup>,  
Ксения Дмитриевна Иванченко<sup>1</sup>, Константин Анатольевич Модестов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии  
наук (ИПМех РАН); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются гармонические продольные волны в полубесконечных дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях, составленных из произвольного числа вязкоупругих слоев. Цель исследования — разработка аналитического решения, а также изучение влияния свойств слоистых материалов и моделей вязкоупругости на дисперсию и затухание волн, что важно для колебательных процессов.

**Материалы и методы.** Метод основан на спектральном представлении уравнений движения и применяется к классическим моделям Кельвина – Фойгта, Максвелла и стандартного линейного твердого тела. Получены явные комплексные дисперсионные соотношения, выражения для коэффициента затухания и критерии резкого роста амплитуды при переходе волны через границу слоев.

**Результаты.** Выявлены зависимости демпфирования от модуля упругости, плотности и времен релаксации/ретардации.

**Выводы.** Предложенный аналитический подход обеспечивает надежную основу для целенаправленного конструирования виброизолирующих метаматериалов и сейсмических барьеров с заданными частотными свойствами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вязкоупругость, продольные волны, дискретно-неоднородные стержни, гармонические воздействия, модель Максвелла, модель Кельвина – Фойгта, модель стандартного линейного тела

*Благодарности.* Работа (С.Г. Саияна) выполнена за счет гранта РНФ № 24-49-02002.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Саиян С.Г., Марасанова А.А., Иванченко К.Д., Модестов К.А. Гармонические продольные волны в дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 207–218. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.207-218

*Автор, ответственный за переписку:* Сергей Гургенович Саиян, berformert@gmail.com.

## Harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous viscoelastic rods

Sergey G. Saiyan<sup>1,2</sup>, Anastasia A. Marasanova<sup>1</sup>, Ksenia D. Ivanchenko<sup>1</sup>,  
Konstantin A. Modestov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Harmonic longitudinal waves in semi-infinite discretely inhomogeneous viscoelastic rods composed of an arbitrary number of viscoelastic layers are considered. The aim of the study is to develop an analytical solution and to investigate the influence of the properties of layered materials and viscoelastic models on wave dispersion and attenuation, which is important for vibration processes.

**Materials and methods.** The method is based on the spectral representation of the equations of motion and is applied to the classical models of Kelvin – Voigt, Maxwell, and the Standard Linear Solid (SLS). Explicit complex dispersion relations, expressions for the damping coefficient, and criteria for the sharp increase in amplitude when a wave passes through layer interfaces were obtained.

**Results.** Dependencies of damping on the elastic modulus, density, relaxation/retardation times.

**Conclusions.** It is concluded that the proposed analytical approach provides a reliable basis for the targeted design of vibration-isolating metamaterials and seismic barriers with predetermined frequency characteristics.

**KEYWORDS:** viscoelasticity, longitudinal waves, discretely inhomogeneous rods, harmonic excitations, Maxwell model, Kelvin – Voigt model, standard linear solid model

*Acknowledgments.* This work (by S.G. Saiyan) was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-49-02002.

**FOR CITATION:** Saiyan S.G., Marasanova A.A., Ivanchenko K.D., Modestov K.A. Harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous viscoelastic rods. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):207-218. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.207-218 (rus.).

*Corresponding author:* Sergey G. Saiyan, berformert@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Распространение гармонических волн в стержнях представляет значительный интерес как для инженерной практики, так и для фундаментальной науки, поскольку связано с управлением колебаниями и прочностью материалов. Особый случай такой задачи — дискретно-неоднородные вязкоупругие стержни, состоящие из чередующихся сегментов с разными механическими свойствами. Подобные слоистые среды широко применяются в инженерной практике. Например, чередование материалов с разной жесткостью и плотностью позволяет создавать полосовые фильтры для волн (фононные кристаллы) [1–4] и эффективно поглощать вибрации на заданных частотах. В сейсмозащите разработаны концепции «сейсмических барьеров», где массивы вертикальных пустот или вставок в грунте играют роль периодических структур, рассеивающих сейсмические волны. Так, показано, что периодические ряды заполненных траншей способны существенно повысить поглощение упругих волн, снижая передачу сейсмических колебаний [5–7]. Эти примеры подчеркивают практическую ценность задачи управления распространением волн в неоднородных средах: правильный подбор слоистой структуры дает возможность создавать метаматериалы, ослабляющие вибрации, переходящие на здания, и защищают инфраструктурные объекты от сейсмического и иного динамического воздействия.

Помимо прикладной значимости, задача распространения волн в неоднородных вязкоупругих средах имеет и важный фундаментальный аспект. Волновые процессы в реальных материалах сопровождаются дисперсией (частотной зависимостью фазовой скорости) и затуханием (рассеянием энергии). Наличие чередующихся слоев приводит к позонной структуре спектра колебаний: возникают запрещенные и пропускные частотные зоны по аналогии с фононными кристаллами. Одномерная периодическая среда (например, бесконечный стержень с периодическим чередованием слоев) — простейший фононный кристалл. В инженерном плане эти явления используются для фильтрации вибраций и создания зон запрещенных частот у виброизолирующих устройств.

Одновременно с учетом неоднородности необходимо адекватно описывать вязкоупругие свойства материалов, поскольку реальные среды не являются

идеально упругими. Вязкоупругость приводит к затуханию волн и дополнительной дисперсии, связанной с частотной зависимостью модуля упругости и диссипации [8–12]. Классические модели вязкоупругости были заложены еще в XIX–XX вв. и основываются на комбинациях идеального упругого элемента (пружины) и вязкого элемента (демпфера Ньютона) [13–15].

В рамках настоящего исследования разработано общее аналитическое решение для полубесконечных дискретно-неоднородных вязкоупругих стержней, состоящих из произвольного количества слоев вязкоупругого материала. Особое внимание в данном решении уделяется изучению поведения различных моделей вязкоупругости (Максвелла, Кельвина – Фойгта, стандартного линейного твердого тела) в случае с дискретно-неоднородной средой, а также исследованиям влияния механических параметров на колебательные процессы. Полученные результаты направлены на разработку методов проектирования сейсмических барьеров с заданными характеристиками и могут быть полезными для проектировщиков и инженеров, занимающихся разработкой и реализацией мер по защите инфраструктурных объектов от сейсмических и прочих динамических воздействий, а также для исследователей, изучающих волновые процессы в неоднородных средах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

*Постановка задачи.* Рассматривается полубесконечный одномерный стержень, состоящий из  $n$ -го количества дискретных участков длиной  $l_n$  (где  $n = 1, 2, \dots, N$ ), вдоль которых упругие и вязкоупругие свойства одинаковы (рис. 1).

Слева задано вынуждающее смещение  $u(0, t) = A_0 e^{i\omega t}$ . Справа — граничное условие излучения (волны, уходящие в бесконечность без отражения) [16–21]. Уравнение движения для каждого участка будет выглядеть следующим образом:

$$-\rho_n \frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial t^2} = \tilde{K}_n \frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $K_n$ ,  $\rho_n$  и  $u_n(x, t)$  — интегральный оператор модуля упругости, плотность и перемещение для  $n$ -го участка стержня;  $t$  — время,  $x$  — пространственная координата.

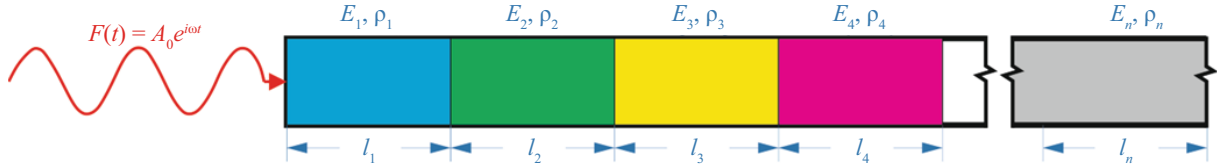


Рис. 1. Полубесконечная дискретно-неоднородная вязкоупругая одномерная среда с гармонической силовой нагрузкой, приложенной к левому концу и неотражающими условиями справа [16, 17]

Fig. 1. A semi-infinite discretely inhomogeneous viscoelastic one-dimensional medium with a harmonic force load applied to the left end and non-reflecting conditions on the right [16, 17]

Аналитическое решение. В основе аналитического решения — переход в спектральное пространство. Преобразование Фурье для уравнения (1):

$$-\rho_n \omega^2 \tilde{u}_n(x, \omega) = \tilde{K}_n(\omega) \frac{\partial^2 \tilde{u}_n(x, \omega)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где тильда над символом обозначает Фурье-образ соответствующей переменной;  $K_n(\omega)$  — Фурье-образ ядра интегрального оператора  $K_n$  (1).

Положим функцию  $u(x, t) = A \exp[i(\omega t - \tilde{k}_n x)]$  и подставим в уравнение (2), получим:

$$-\rho_n \omega^2 \tilde{u}_n(x, \omega) = -\tilde{K}_n(\omega) \tilde{k}_n \tilde{u}_n(x, \omega), \quad (3)$$

где  $\tilde{k}_n = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\tilde{K}_n(\omega)}}$  — комплексные волновые числа, учитывающие диссипацию энергии (для вязкоупругого случая).

Представим комплексное ядро в экспоненциальной форме:

$$\tilde{k}_n = \omega \sqrt{\frac{\rho}{|\tilde{K}_n| \exp(i \arg \tilde{K}_n)}}, \quad (4)$$

где  $\arg \tilde{K}_n$  — угол потерь. Комплексное волновое число можно представить в виде:

$$k_n = k_{1,n} + ik_{2,n} = \omega/c_n - i\alpha_n, \quad (5)$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент затухания волны. Он отвечает за экспоненциальное убывание амплитуды волны при ее распространении в среде с диссипативными (поглощающими) свойствами. Взяв действительную и мнимую части, получим:

$$k_{1,n} = \frac{\omega}{c_n} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{|\tilde{K}_n|}} \cos\left(\frac{\arg \tilde{K}_n}{2}\right); \quad (6)$$

$$k_{2,n} = -\alpha_n = -\omega \sqrt{\frac{\rho}{|\tilde{K}_n|}} \sin\left(\frac{\arg \tilde{K}_n}{2}\right).$$

Подставим найденные выражения для  $k_{1,n}$  и  $k_{2,n}$  в функцию  $u(x, t)$ :

$$u_n(x, t) = A \exp\left\{i \left[ \omega t - \sqrt{\frac{\rho}{|\tilde{K}_n|}} \omega \cos\left(\frac{\arg \tilde{K}_n}{2}\right) x \right] - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\frac{\rho}{|\tilde{K}_n|}} \omega \sin\left(\frac{\arg \tilde{K}_n}{2}\right) x \right\}. \quad (7)$$

Условия сшивки решения (неразрывность перемещений и напряжений на границах участков) в общем случае:

$$u_n\left(\sum_{i=1}^n l_i, t\right) = u_{n+1}\left(\sum_{i=1}^n l_i, t\right); \quad (8)$$

$$\tilde{K}_n \frac{\partial u_n}{\partial x}\left(\sum_{i=1}^n l_i, t\right) = \tilde{K}_{n+1} \frac{\partial u_{n+1}}{\partial x}\left(\sum_{i=1}^n l_i, t\right). \quad (9)$$

Решение данного уравнения будет находиться в виде сумм бегущих волн (прямых и отраженных) в комплексных переменных:

$$u_n(x, t) = A_n^L \exp[i(\omega t - k_{1,n} x - ik_{2,n} x)] + A_n^R \exp[i(\omega t + k_{1,n} x + ik_{2,n} x)]. \quad (10)$$

Тогда общая система линейных уравнений относительно неизвестных запишется в следующем виде (для  $n$  участков и  $2n-1$  неизвестных):

$$\left\{ \begin{aligned} & A_n^L \exp\left[(-ik_{1,n} + k_{2,n})L_n\right] + \\ & + A_n^R \exp\left[(ik_{1,n} - k_{2,n})L_n\right] = \\ & = A_{n+1}^L \exp\left[(-ik_{1,n+1} + k_{2,n+1})L_n\right] + \\ & + A_{n+1}^R \exp\left[(ik_{1,n+1} - k_{2,n+1})L_n\right]; \\ & \tilde{K}_n \left\{ A_n^L (-ik_{1,n} + k_{2,n}) \exp\left[(-ik_{1,n} + k_{2,n})L_n\right] + \right. \\ & \left. + A_n^R (ik_{1,n} - k_{2,n}) \exp\left[(ik_{1,n} - k_{2,n})L_n\right] \right\} = \\ & = \tilde{K}_{n+1} \left\{ A_{n+1}^L (-ik_{1,n+1} + k_{2,n+1}) \times \right. \\ & \times \exp\left[(-ik_{1,n+1} + k_{2,n+1})L_n\right] + A_{n+1}^R (ik_{1,n+1} - k_{2,n+1}) \times \\ & \times \exp\left[(ik_{1,n+1} - k_{2,n+1})L_n\right] \left. \right\}; \\ & A_0 = A_1^L + A_1^R; \\ & A_N^R = 0. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Все рассмотренные графики в разделе Результаты приведены для  $N = 3$  слоя. Тогда матрица коэффициентов представляется в следующем виде:

$$\begin{pmatrix}
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_1}{K_1}}l_1} & e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_1}{K_1}}l_1} & -e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}l_1} & -e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}l_1} & 0 & 0 \\
 -i\omega\sqrt{\rho_1\tilde{K}_1}e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_1}{K_1}}l_1} & i\omega\sqrt{\rho_1\tilde{K}_1}e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_1}{K_1}}l_1} & i\omega\sqrt{\rho_2\tilde{K}_2}e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}l_1} & -i\omega\sqrt{\rho_2\tilde{K}_2}e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}l_1} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}(l_1+l_2)} & e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}(l_1+l_2)} & -e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_3}{K_3}}(l_1+l_2)} & -e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_3}{K_3}}(l_1+l_2)} \\
 0 & 0 & -i\omega\sqrt{\rho_2\tilde{K}_2}e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}(l_1+l_2)} & i\omega\sqrt{\rho_2\tilde{K}_2}e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_2}{K_2}}(l_1+l_2)} & i\omega\sqrt{\rho_3\tilde{K}_3}e^{-i\omega\sqrt{\frac{\rho_3}{K_3}}(l_1+l_2)} & -i\omega\sqrt{\rho_3\tilde{K}_3}e^{i\omega\sqrt{\frac{\rho_3}{K_3}}(l_1+l_2)} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix} \quad (12)$$

В настоящее время популярны полимеры, которые обладают вязкоупругими свойствами. Для их описания были придуманы модели (в данной работе будут рассмотрены модели: Кельвина – Фойгта, Максвелла, стандартного линейного твердого тела (СЛТТ)), которые состоят из упругих и вязких элементов. Они учитывают историю деформации материала.

Многие вязкоупругие среды хорошо описываются стандартными моделями Максвелла, Кельвина – Фойгта, а также СЛТТ. Модель Максвелла состоит из последовательно соединенных пружин (элемент Гука) с модулем упругости  $E$  и элемента демпфера (элемент Ньютона) с коэффициентом вязкости  $\eta$ :

$$\sigma + \tau_\epsilon \dot{\sigma} = E_\infty \tau_\epsilon \dot{\epsilon}, \quad (13)$$

где  $\tau_\epsilon = \eta/E_\infty$  — время релаксации;  $E_\infty = E$  — нерелаксированный (или мгновенный) модуль упругости.

Модель Кельвина – Фойгта — это классическая модель вязкоупругости, представляющая собой параллельное соединение упругого элемента и демпфера:

$$\sigma = E_0 \epsilon + E_0 \tau_\sigma \dot{\epsilon}, \quad (14)$$

где  $E_0 = E$  — релаксированный (или длительный) модуль упругости;  $\tau_\sigma = \eta/E_0$  — время ретардации (или время запаздывания).

Модель СЛТТ — это одна из фундаментальных моделей вязкоупругости, которая сочетает в себе элементы мгновенной упругости и вязкости. Она учитывает как релаксацию напряжений, так и ползучесть, что делает ее более точной по сравнению с простыми моделями Максвелла и Кельвина – Фойгта. Общий вид этой модели:

$$\sigma + \tau_\epsilon \dot{\sigma} = E_0 (\epsilon + \tau_\sigma \dot{\epsilon}). \quad (15)$$

Данная модель имеет две модификации (модель Пойтинга – Томсона – Ишлинского и модель Зинера – Ржаницына). Для модели Пойтинга – Томсона – Ишлинского в уравнении (15) приняты следующие обозначения:

$E_0 = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$  — релаксированный модуль упругости модели;  $E_\infty = E_1$  — нерелаксированный модуль, а  $\tau_\epsilon = \frac{\eta}{E_1 + E_2}$  и  $\tau_\sigma = \frac{\eta}{E_2}$  — соответственно характерные времена релаксации и запаздывания.

Для модели Зинера – Ржаницына в уравнении (15) приняты следующие обозначения:  $E_0 = E_2$  — релаксированный модуль упругости модели;  $E_\infty = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$  — нерелаксированный модуль;  $\tau_\epsilon = \frac{\eta}{E_1}$  и  $\tau_\sigma = \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \eta$  — соответственно характерные времена релаксации и запаздывания.

роанный модуль упругости модели;  $E_\infty = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$  — нерелаксированный модуль;  $\tau_\epsilon = \frac{\eta}{E_1}$  и  $\tau_\sigma = \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \eta$  — соответственно характерные времена релаксации и запаздывания.

Для каждой из моделей был найден Фурье-образ ядра, который уже непосредственно использовался для нахождения функции перемещения.  $\tilde{K} = E_0(1 + i\omega\tau_\sigma)$  — для модели Кельвина – Фойгта;  $\tilde{K} = \frac{i\omega\tau_\epsilon E_\infty}{i\omega\tau_\epsilon + 1}$  — для модели Максвелла;  $\tilde{K} = E_0 \frac{1 + i\omega\tau_\sigma}{1 + i\omega\tau_\epsilon}$  — для модели СЛТТ.

Наибольшую опасность для сооружений представляют случаи, когда амплитуда при переходе волны из одной среды в другую возрастает. Найдем такое отношение модулей упругости и плотностей смежных сред, чтобы наблюдалось данное явление:

$$|A^L_1| + |A^R_1| < |A^L_2| + |A^R_2|.$$

Пусть граница перехода из одного слоя в другой находится при  $x = 0$ . Оба слоя упругие (т.е.  $k_{2,n} = -\alpha_n = 0$ ). Тогда из условий сшивки (8) и (9) получим:

$$A^L_1 + A^R_1 = A^L_2 + A^R_2; \quad (16)$$

$$k_1 E_1 [-A^L_1 + A^R_1] = k_2 E_2 [-A^L_2 + A^R_2]; \quad (17)$$

$$c_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}; \quad (18)$$

$$k_i = \frac{\omega}{c_i} = \omega \sqrt{\frac{\rho_i}{E_i}}, \quad (19)$$

где  $c_i$  — скорость продольной волны.

Подставляя (19) в (17), получим:

$$\sqrt{E_1 \rho_1} [-A^L_1 + A^R_1] = \sqrt{E_2 \rho_2} [-A^L_2 + A^R_2]. \quad (20)$$

Так как амплитуды — комплексные числа, их можно представить в виде векторов (рис. 2). То есть суммы векторов должны быть одинаковы (16), а их разность отличаться на константу (20). Это можно реализовать, например, как показано на рис. 2.

Получаем, что сумма векторов одинаковая, сумма модулей вторых амплитуд больше суммы модулей первых, а чтобы условие разности выполнялось необходимо, чтобы  $E_1 \rho_1 > E_2 \rho_2$  (если  $E_1 \rho_1 < E_2 \rho_2$ , то  $|A^L_1| + |A^R_1| > |A^L_2| + |A^R_2|$ ).

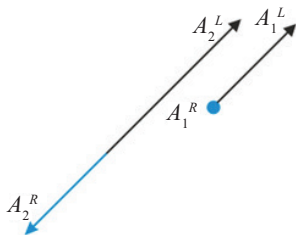
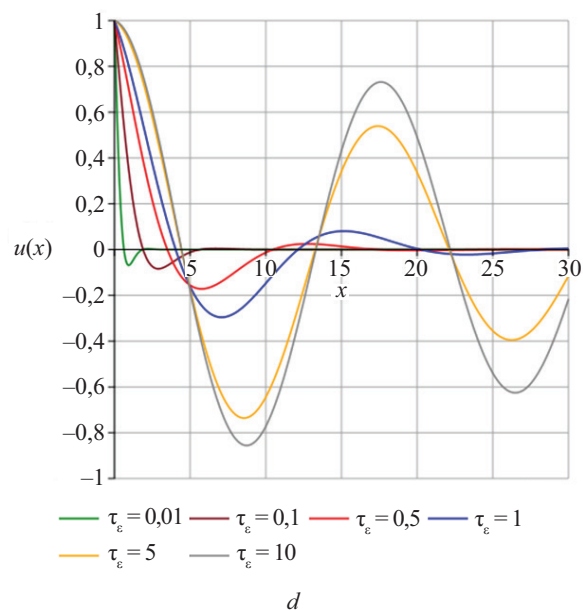
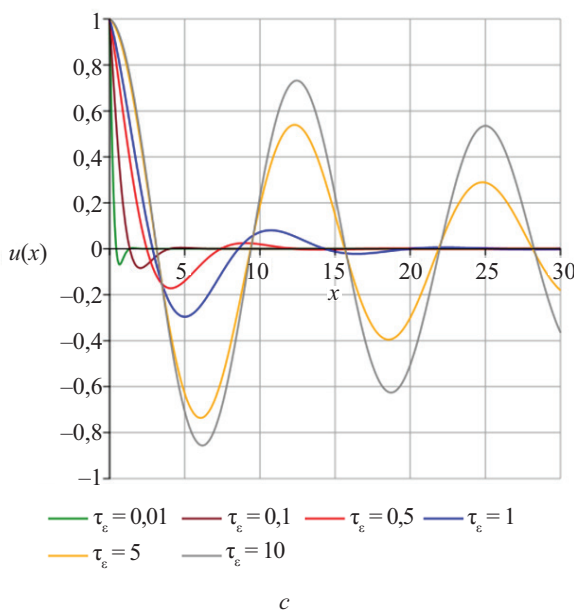
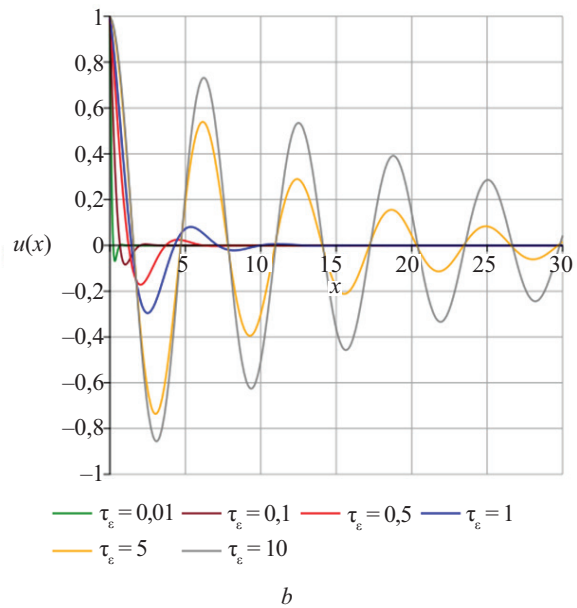
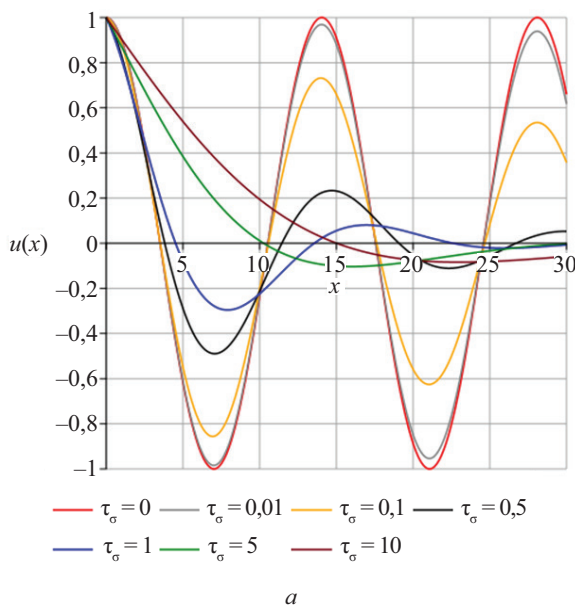


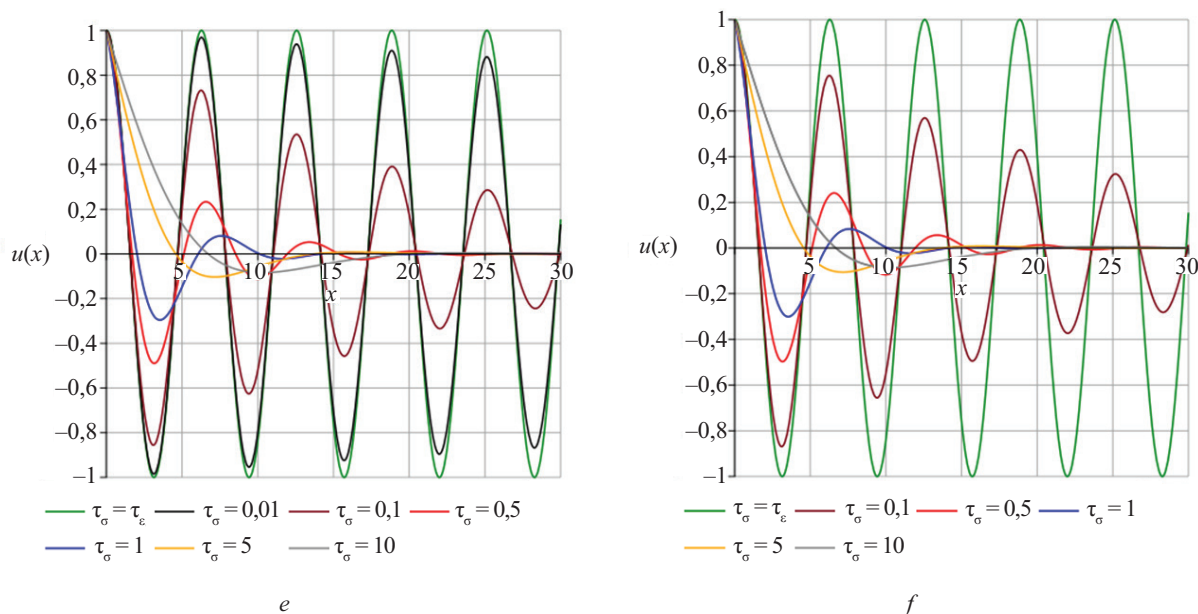
Рис. 2. Векторное представление амплитуд  
Fig. 2. Vector representation of amplitudes

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В данном разделе приведены результаты моделирования для  $N = 3$  участков с длинами  $l_1 = l_2 = l_3 = 10$ . Для всех случаев принято, что  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ ;  $\omega = 1$  и  $A_0 = 1$ . С целью исследования влияния времен ре-

тардации и релаксации на затухание для различных моделей вязкоупругого материала изучим графики, полученные в результате моделирования колебаний при варьировании этих параметров. Все задаваемые программе величины приведены в условных единицах. Изучим графики зависимости перемещения  $u(x, t)$  от координаты  $x$  при фиксированном времени  $t$ , полученные в результате моделирования колебаний при варьировании значений  $\tau_\sigma$  и  $\tau_\varepsilon$ . Все задаваемые величины приведены в условных единицах. Программа не привязана к конкретной системе измерений, но требует согласованности единиц для всех вводимых параметров. На рис. 3 показаны графики зависимости амплитуд колебаний при различных моделях и параметрах вязкоупругого материала. Отметим, что модель СЛТТ при  $\tau_\sigma = \tau_\varepsilon$  переходит в чисто упругую.





**Рис. 3.** Графики зависимости амплитуд колебаний при различных моделях и параметрах вязкоупругого материала: *a* — модель Кельвина – Фойгта:  $E_1 = E_2 = E_3 = 5$  для разного времени ретардации  $\tau_\sigma$ ; *b* — модель Максвелла:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$  для разного времени релаксации  $\tau_\epsilon$ ; *c* — модель Максвелла:  $E_1 = E_2 = E_3 = 4$  для разного времени релаксации  $\tau_\epsilon$ ; *d* — модель Максвелла:  $E_1 = E_2 = E_3 = 8$  для разного времени релаксации  $\tau_\epsilon$ ; *e* — модель СЛТТ:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$  без времени релаксации  $\tau_\epsilon$  и при разном времени ретардации  $\tau_\sigma$ ; *f* — модель СЛТТ:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$ , время релаксации  $\tau_\epsilon = 0,01$  и при разном времени ретардации  $\tau_\sigma$

**Fig. 3.** Graphs of the dependence of vibration amplitudes for various models and parameters of the viscoelastic material: *a* — Kelvin – Voigt model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 5$  for different retardation times; *b* — Maxwell model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$  for different relaxation times; *c* — Maxwell model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 4$  for different relaxation times; *d* — Maxwell model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 8$  for different relaxation times; *e* — SLS model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$  without relaxation time and for different retardation times; *f* — SLS model:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$ , relaxation time = 0.01, and for different retardation times

Исходя из результатов, можно утверждать следующее:

1. Для модели Кельвина – Фойгта при фиксированном значении модулей ( $E_1 = E_2 = E_3 = 5$ ) и изменении времени ретардации  $\tau_\sigma$  заметно, что чем больше  $\tau_\sigma$ , тем сильнее проявляется эффект вязкого демпфирования колебаний. Для малых  $\tau_\sigma$  колебания затухают слабее, кривая дольше сохраняет заметную амплитуду. При больших  $\tau_\sigma$  происходит более быстрое затухание — волна «заглаживается» еще в начале процесса распространения.

2. Для модели Максвелла при фиксированном значении модулей ( $E_1 = E_2 = E_3 = 1$ ) и изменении времени релаксации  $\tau_\epsilon$  заметно, что чем меньше  $\tau_\epsilon$ , тем сильнее проявляется эффект вязкого демпфирования колебаний. Для больших  $\tau_\epsilon$  колебания затухают слабее, кривая дольше сохраняет заметную амплитуду. При малых  $\tau_\epsilon$  происходит более быстрое затухание — волна «заглаживается» еще в начале процесса распространения. Сравнение графиков с  $E = 1$ ,  $E = 4$  и  $E = 8$  показывает, что повышение модуля упругости увеличивает скорость волны и заметно сдвигает максимумы и минимумы колебаний. С увеличением  $E$  жесткость стержня растет, поэтому фаза колебаний распределяется быстрее вдоль стержня.

На рис. 4 представлены волны в вязкоупругом стержне (модель Кельвина – Фойгта) при разных частотах внешнего воздействия  $\omega$ , длины каждого участка  $l = 10$ , плотность  $\rho = 1$ , модуль упругости первого участка —  $E_1 = 1$ , второго —  $E_2 = 0,1$ , третьего —  $E_3 = 2$ . При  $\tau_\sigma = 0$  модель Кельвина – Фойгта переходит в чисто упругую.

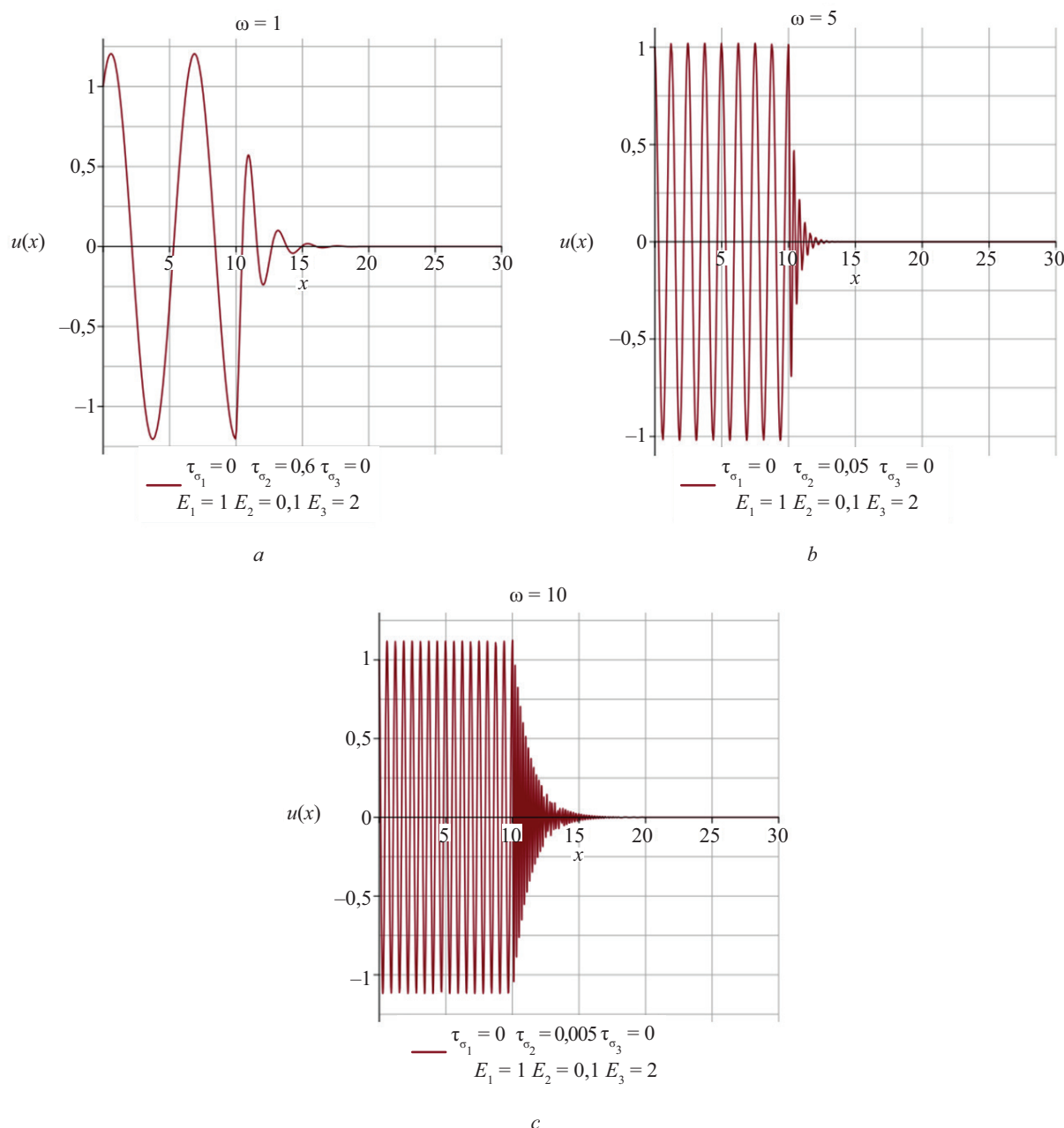
В модели Кельвина – Фойгта затухание растет быстрее, чем линейно. На рис. 4 увеличение амплитуды на первом участке происходит вследствие наложения двух волн (прямой и отраженной), вызванных интерференцией:

$$A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx + \varphi_0) = 2A \cos(\omega t + \varphi_0/2) \cos(kx + \varphi_0/2). \tag{21}$$

Подобное соединение стержней приводит к полосовому подавлению, когда энергия отраженной стоячей волны улавливается в мягком поглощающем слое. Чем выше частота, тем тоньше необходим слой для полного гашения.

На рис. 5 показаны волны в однородном вязкоупругом стержне (модель Кельвина – Фойгта) с модулем упругости  $E = 5$ , с начальной амплитудой  $A = 1$ , с начальными частотами  $\omega = 5$  и  $10$  соответственно.

Для высоких частот демпфирование происходит несоразмерно быстрее. Для подавления колеба-



**Рис. 4.** Графики зависимости амплитуд колебаний для модели Кельвина – Фойгта при различных частотах колебаний внешнего воздействия

**Fig. 4.** Graphs of the dependence of vibration amplitudes for the Kelvin – Voigt model at different frequencies of external excitation

ний при  $\omega = 10$  достаточно  $\tau_{\sigma} \approx 0,05$ , тогда как для  $\omega = 5$  потребуется  $\tau_{\sigma} \approx 0,1-0,2$ . Величина  $\tau_{\sigma}$  задает режим материала. Изменяя  $\eta$ , можно целенаправленно перевести материал из колебательного режима в аperiodическое затухание или обратно, адаптируя демпфер под нужную полосу частот. Тем самым результаты подтверждают квадратичную зависимость затухания от частоты в модели Кельвина – Фойгта и показывают, как выбор времени ретардации позволяет точно контролировать диапазон подавляемых колебаний. На рис. 6 представлены волны в однородном вязкоупругом стержне (модель Мак-

свелла) с модулем упругости, равным  $E = 5$ , с начальной амплитудой  $A_0 = 1$  и частотами  $\omega = 5$  и 10 соответственно.

Чем выше  $\omega$ , тем меньше  $\tau_{\sigma}$  нужно, чтобы материал испытывал большие затухания. Для случаев, где  $\omega \tau_{\sigma} \ll 1$ , затухание растет пропорционально  $\omega^2$ . Для случаев, где  $\omega \tau_{\sigma} \gg 1$ , увеличение  $\tau_{\sigma}$  снижает  $\alpha$ , поэтому длительные времена релаксации выгодны, если стоит цель минимизировать демпфирование системы.

Как уже упоминалось, наибольшую опасность представляют такие отношения смежных модулей упругости и плотностей, при которых происходит

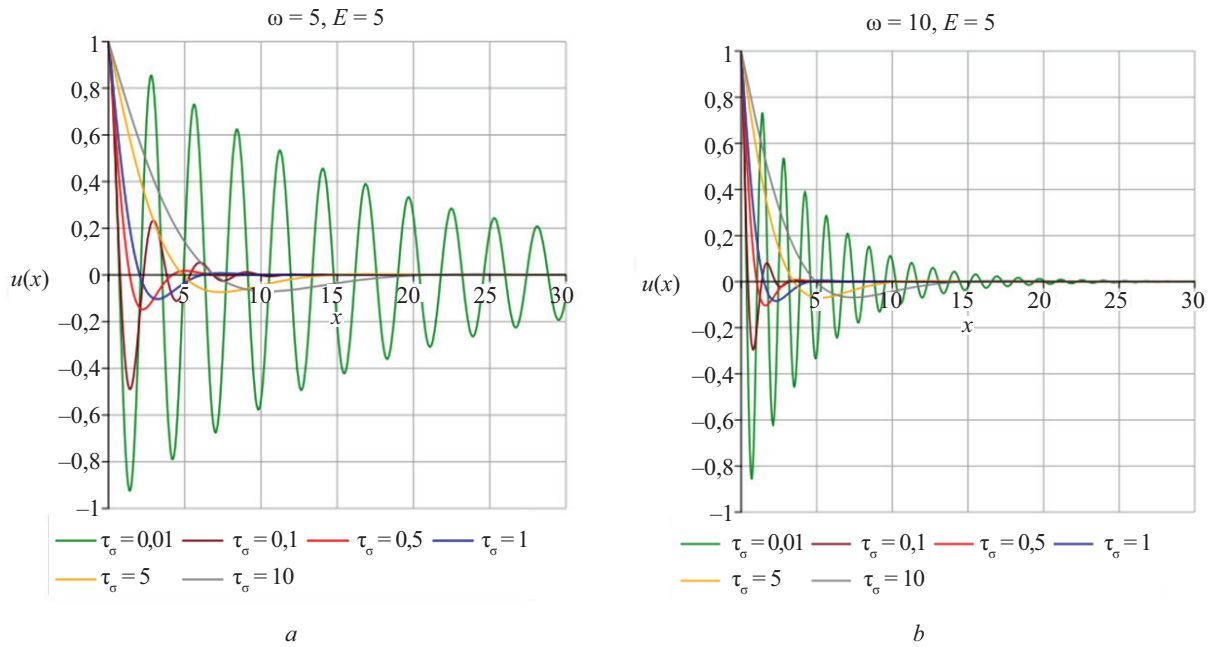


Рис. 5. Графики зависимости амплитуд колебаний для модели Кельвина – Фойгта при различных частотах колебаний внешнего воздействия и время ретардации

Fig. 5. Graphs of the dependence of vibration amplitudes for the Kelvin – Voigt model at different frequencies of external excitation and retardation times

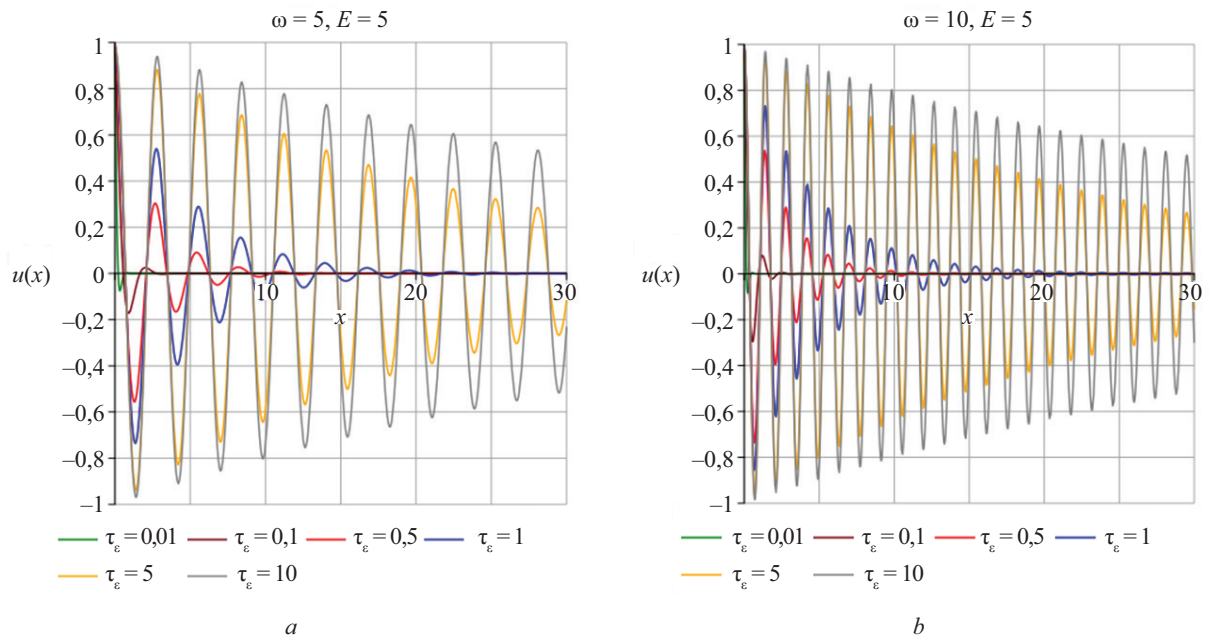
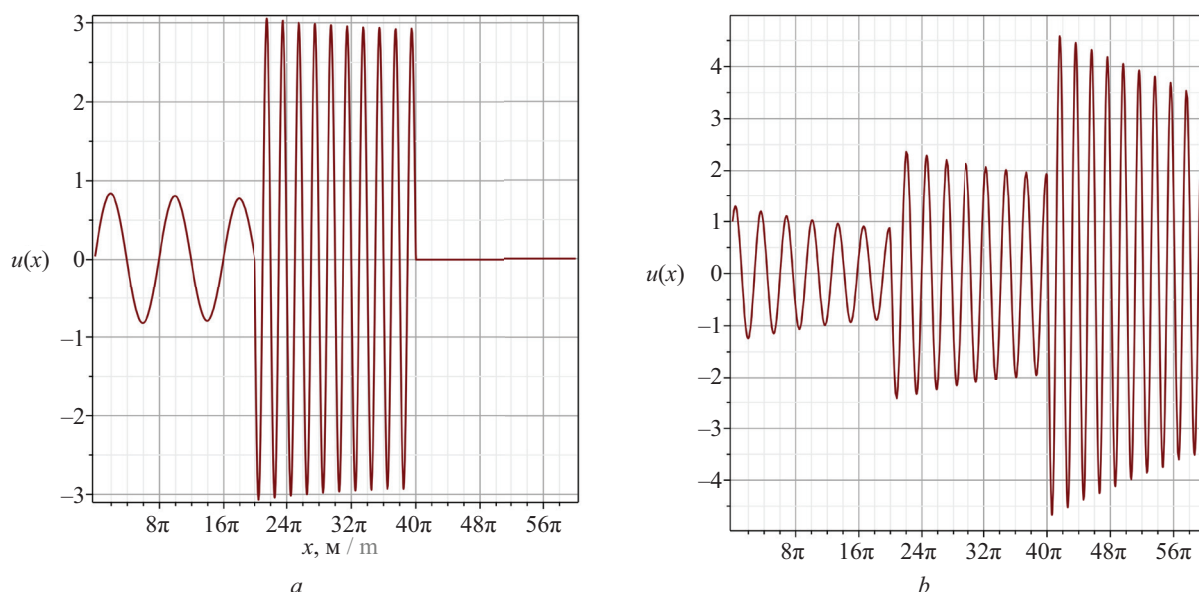


Рис. 6. Графики зависимости амплитуд колебаний для модели Максвелла при различных частотах колебаний внешнего воздействия и времени релаксации

Fig. 6. Graphs of the dependence of vibration amplitudes for the Maxwell model at different frequencies of external excitation and relaxation times

возрастание амплитуды при переходе волны из слоя в слой. На рис. 7 приведены два примера полубесконечного упругого стержня, состоящего из трех слоев. Первый пример иллюстрирует ситуацию, когда  $E_1\rho_1 > E_2\rho_2 \ll E_3\rho_3$ . Как видно на графике (рис. 7, a), ампли-

туда на втором участке гораздо больше, чем на первом и третьем участках. Второй пример основан на предположении, что  $E_1\rho_1 > E_2\rho_2 > E_3\rho_3$ . На графике (рис. 7, b) видно, что при переходе из одного слоя в другой амплитуда возрастает.



**Рис. 7.** Графики амплитуд колебаний для модели Кельвина – Фойгта: *a* —  $E_1 = 16, E_2 = 1, E_3 = 10\,000\,000$  для  $\tau_{\sigma,1} = \tau_{\sigma,2} = \tau_{\sigma,3} = 0,01, l_1 = l_2 = l_3 = 20\pi, \rho_1 = \rho_2 = 1, \rho_3 = 10\,000\,000$ ; *b* —  $E_1 = 256, E_2 = 16, E_3 = 1, \tau_{\sigma,1} = \tau_{\sigma,2} = \tau_{\sigma,3} = 0,01, \rho_1 = 100, \rho_2 = 10, \rho_3 = 1, l_1 = l_2 = l_3 = 20\pi$

**Fig. 7.** Vibration amplitude plots for the Kelvin – Voigt model: *a* —  $E_1 = 16, E_2 = 1, E_3 = 10,000,000$  for  $\tau_{\sigma,1} = \tau_{\sigma,2} = \tau_{\sigma,3} = 0.01, l_1 = l_2 = l_3 = 20\pi, \rho_1 = \rho_2 = 1, \rho_3 = 10,000,000$ ; *b* —  $E_1 = 256, E_2 = 16, E_3 = 1, \tau_{\sigma,1} = \tau_{\sigma,2} = \tau_{\sigma,3} = 0.01, \rho_1 = 100, \rho_2 = 10, \rho_3 = 1, l_1 = l_2 = l_3 = 20\pi$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенного исследования моделирования распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработан универсальный аналитический метод решения задачи о гармонических продольных волнах в полубесконечных дискретно-неоднородных вязкоупругих стержнях, позволяющий корректно учитывать условия сшивки на границах слоев и анализировать любые комбинации упругих и вязкоупругих участков.

2. Получены явные дисперсионные соотношения с комплексным волновым числом, определяющим как дисперсию, так и затухание.

3. Проведен параметрический анализ моделей вязкоупругости. Для модели Кельвина – Фойгта установлено, что при фиксированном модуле упругости  $E$  рост времени ретардации  $\tau_\sigma$  усиливает вязкое демпфирование; для  $\tau_\sigma \gg 1$  волна затухает уже на начальном участке распространения (рис. 3, *a*).

Для модели Максвелла увеличение времени релаксации  $\tau_\epsilon$  при постоянном  $E$  уменьшает затухание; увеличение модуля упругости ускоряет фазовое продвижение и перестраивает картину максимумов/минимумов (рис. 3, *b–d*). Для модели СЛТТ сочетание  $\tau_\epsilon$  и  $\tau_\sigma$  позволяет независимо настраивать ползучесть и релаксацию, что демонстрируют графики (рис. 3, *e, f*).

4. Установлены условия резкого возрастания амплитуды при переходе волны через границу слоев. На основе векторного представления амплитуд получены критерии, связывающие отношение модулей упругости и плотностей соседних слоев с усилением колебаний; численные примеры (рис. 7) подтверждают возможность многократного роста амплитуды во втором слое для  $E_2 < E_1, E_3$ .

5. Полученные зависимости и критерии усиления амплитуд позволяют в первом приближении целенаправленно проектировать сейсмические метаматериалы с заданными полосами запрещенных частот, а также сейсмические барьеры, улавливающие энергию поверхностных волн в мягких слоях.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баенова Г.М., Сеньковская А.А. Обзор фоновых кристаллов и акустических метаматериалов // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 72-1. С. 23–26. DOI: 10.18411/lj-04-2021-03. EDN GSXMNL.

2. Lim C.W. From photonic crystals to seismic metamaterials: a review via phononic crystals and acoustic metamaterials // Archives of Computational Methods in Engineering. 2021. Vol. 29. Issue 2. Pp. 1137–1198. DOI: 10.1007/s11831-021-09612-8

3. Кузнецов С.В., Саиян С.Г. Нелинейные акустические волны в гиперупругих стержнях // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2025. № 2. С. 210–225. DOI: 10.31857/S1026351925020129. EDN ANREGK.
4. Ma J. Phonon engineering of micro- and nano-phononic crystals and acoustic metamaterials : a review // Small Science. 2023. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1002/smssc.202200052
5. Qahtan A.S., Huang J., Amran M., Qader D.N., Fediuk R., Wael A.D. Seismic composite metamaterial : a review // Journal of Composites Science. 2022. Vol. 6. Issue 11. P. 348. DOI: 10.3390/jcs6110348
6. Morozov N.F., Bratov V.A., Kuznetsov S.V. Seismic barriers for protection against surface and head-waves: multiple scatters and metamaterials // Mechanics of Solids. 2021. Vol. 56. Issue 6. Pp. 911–921. DOI: 10.3103/S0025654421060133
7. Bratov V., Kuznetsov S., Morozov N. Seismic barriers filled with solid elastic and granular materials: Comparative analysis // Mathematics and Mechanics of Solids. 2022. Vol. 27. Issue 9. Pp. 1761–1770. DOI: 10.1177/10812865221104235
8. Ormachea J., Parker K.J. Comprehensive viscoelastic characterization of tissues and the inter-relationship of shear wave (group and phase) velocity, attenuation and dispersion // Ultrasound in Medicine & Biology. 2020. Vol. 46. Issue 12. Pp. 3448–3459. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2020.08.023
9. Саиян С.Г., Модестов К.А., Брыгар О.А. Моделирование волновых процессов в толстостенной вязкоупругой сферической оболочке при импульсном воздействии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 4 (61). С. 31–39. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-4/31-39. EDN FGFXNM.
10. Shitikova M.V., Modestov K.A., Brygar O.A. Harmonic wave propagation modelling in viscoelastic rods via Rzhantsyn fractional order operators // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3177. P. 030003. DOI: 10.1063/5.0294973. EDN EFKMP.
11. Carcione J.M., Kosloff D., Kosloff R. Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium // Geophysical Journal International. 1988. Vol. 95. Issue 3. Pp. 597–611. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1988.tb06706.x
12. Lai C.G., Rix G.J., Foti S., Roma V. Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2002. Vol. 22. Issue 9–12. Pp. 923–930. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00116-1
13. Shitikova M.V., Krusser A.I. Models of viscoelastic materials : a review on historical development and formulation // Advanced Structured Materials. 2022. Pp. 285–326. DOI: 10.1007/978-3-031-04548-6\_14
14. Lau H.C.P. Surface loading on a self-gravitating, linear viscoelastic Earth: moving beyond Maxwell // Geophysical Journal International. 2024. Vol. 237. Issue 3. Pp. 1842–1857. DOI: 10.1093/gji/ggae149
15. Shu Z., You R., Zhou Y. Viscoelastic materials for structural dampers : a review // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 342. P. 127955. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127955
16. Саиян С.Г. Аналитические решения прохождения поверхностных волн через энергопоглощающие сейсмические барьеры // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тез. докл. IX Междунар. симпозиума. 2025. С. 102–103. EDN FBKRGV.
17. Modestov K., Saiyan S., Erokhin A., Brygar O. Derivation of the one-dimensional radiation condition in elasticity theory by introducing infinitesimal viscosity // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003025
18. Shitikova M.V., Modestov K.A. Analysis of Harmonic Wave Propagation in Fractional Derivative Viscoelastic Media Based on Time-Dependent Modulus of the P-Wave // Mechanics of Solids. 2024. Vol. 59. Issue 8. Pp. 3949–3967. DOI: 10.1134/S00256544246-07079
19. Шитикова М.В. Обзор вязкоупругих моделей с операторами дробного порядка, используемых в динамических задачах механики твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 1. С. 3–40. DOI: 10.31857/S0572329921060118. EDN QMNNKY.
20. Модестов К.А., Шитикова М.В. Распространение гармонических волн в вязкоупругих средах, описываемых моделями с дробными производными // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25. № 2. С. 214–230. DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-2-214-230. EDN PVASPW.
21. Gulkanov A.G., Modestov K.A., Shitikova M.V., Erokhin A.V. Propagation of harmonic waves in viscoelastic rods via the fractional derivative models // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3271. P. 060002. DOI: 10.1063/5.0251912

Поступила в редакцию 20 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 24 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Гургенович Саиян — научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), старший преподаватель кафедры строительной и теоретической механики, преподаватель

кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; младший научный сотрудник; **Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)**; 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1; SPIN-код: 3337-7862, РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; berformert@gmail.com;

**Анастасия Андреевна Марасанова** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; marasanova2004@gmail.com;

**Ксения Дмитриевна Иванченко** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ivanchenko.ksenia@gmail.com;

**Константин Анатольевич Модестов** — старший преподаватель кафедры общей и прикладной физики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; младший научный сотрудник Международного научного центра по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук имени заслуженного деятеля науки РФ профессора Россихина Ю.А.; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; SPIN-код: 6850-4620, РИНЦ ID: 635355, Scopus: 57202800599, ResearcherID: C-9948-2016, ORCID: 0000-0003-4596-2652; ModestovKA@mgsu.ru.

*Вклад авторов:*

*Саиян С.Г. — научное руководство, концепция исследования, методология исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.*

*Марасанова А.А. — написание текста статьи, расчеты в MapleSoft.*

*Иванченко К.Д. — написание текста статьи, расчеты в MapleSoft.*

*Модестов К.А. — разработка математической модели, научное редактирование текста.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Baenova G.M., Sen'kovskaya A.A. Review of phononic crystals and acoustic metamaterials. *Trends in the Development of Science and Education*. 2021; 72-1:23-26. DOI: 10.18411/lj-04-2021-03. EDN GSXMNL. (rus.).
2. Lim C.W. From photonic crystals to seismic metamaterials : a review via phononic crystals and acoustic metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021; 29(2):1137-1198. DOI: 10.1007/s11831-021-09612-8
3. Kuznetsov S.V., Saiyan S.G. Nonlinear acoustic waves in hyperelastic rods. *Mechanics of Solids*. 2025; 2:210-225. DOI: 10.31857/S1026351925020129. EDN ANREGK. (rus.).
4. Ma J. Phonon engineering of micro- and nanophononic crystals and acoustic metamaterials : a review. *Small Science*. 2023; 3(1). DOI: 10.1002/smssc.202200052
5. Qahtan A.S., Huang J., Amran M., Qader D.N., Fediuk R., Wael A.D. Seismic composite metamaterial : a review. *Journal of Composites Science*. 2022; 6(11):348. DOI: 10.3390/jcs6110348
6. Morozov N.F., Bratov V.A., Kuznetsov S.V. Seismic barriers for protection against surface and headwaves: multiple scatters and metamaterials. *Mechanics of Solids*. 2021; 56(6):911-921. DOI: 10.3103/S00256-54421060133
7. Bratov V., Kuznetsov S., Morozov N. Seismic barriers filled with solid elastic and granular materials: Comparative analysis. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022; 27(9):1761-1770. DOI: 10.1177/10812865221104235
8. Ormachea J., Parker K.J. Comprehensive viscoelastic characterization of tissues and the inter-relationship of shear wave (group and phase) velocity, attenuation and dispersion. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2020; 46(12):3448-3459. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2020.08.023
9. Saiyan S.G., Modestov K.A., Brygar O.A. Modeling of wave processes in a thick-walled viscoelastic spherical shell under impulse load. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024; 4(61):31-39. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-4/31-39. EDN FGFXNM. (rus.).
10. Shitikova M.V., Modestov K.A., Brygar O.A. Harmonic wave propagation modelling in viscoelastic rods via Rzhantsyn fractional order operators. *AIP Conference Proceedings*. 2024; 3177:030003. DOI: 10.1063/5.0294973. EDN EFIKMP.
11. Carcione J.M., Kosloff D., Kosloff R. Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium. *Geophysical Journal International*. 1988; 95(3):597-611. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1988.tb06706.x
12. Lai C.G., Rix G.J., Foti S., Roma V. Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves. *Soil Dynamics and*

*Earthquake Engineering*. 2002; 22:9-12:923-930. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00116-1

13. Shitikova M.V., Krusser A.I. Models of viscoelastic materials : a review on historical development and formulation. *Advanced Structured Materials*. 2022; 285-326. DOI: 10.1007/978-3-031-04548-6\_14

14. Lau H.C.P. Surface loading on a self-gravitating, linear viscoelastic Earth: moving beyond Maxwell. *Geophysical Journal International*. 2024; 237(3): 1842-1857. DOI: 10.1093/gji/ggae149

15. Shu Z., You R., Zhou Y. Viscoelastic materials for structural dampers : a review. *Construction and Building Materials*. 2022; 342:127955. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127955

16. Saiyan S.G. Analytical solutions for the propagation of surface waves through energy-absorbing seismic barriers. *Actual Problems of Computer Modeling of Structures : Proceedings Abstracts of the 9th International Symposium*. 2025; 102-103. EDN FBKRGV. (rus.).

17. Modestov K., Saiyan S., Erokhin A., Brygar O. Derivation of the one-dimensional radiation condition in elasticity theory by introducing infinitesimal viscos-

ity. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003025

18. Shitikova M.V., Modestov K.A. Analysis of Harmonic Wave Propagation in Fractional Derivative Viscoelastic Media Based on Time-Dependent Modulus of the P-Wave. *Mechanics of Solids*. 2024; 59(8):3949-3967. DOI: 10.1134/S0025654424607079

19. Shitikova M.V. Fractional operator viscoelastic models in dynamic problems of mechanics of solids : a review. *Mechanics of Solids*. 2022; 1:3-40. DOI: 10.31857/S0572329921060118. EDN QMNNKY. (rus.).

20. Modestov K.A., Shitikova M.V. Harmonic wave propagation in viscoelastic media modelled via fractional derivative models. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2025; 25(2):214-230. DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-2-214-230. EDN PVASPW. (rus.).

21. Gulkanov A.G., Modestov K.A., Shitikova M.V., Erokhin A.V. Propagation of harmonic waves in viscoelastic rods via the fractional derivative models. *AIP Conference Proceedings*. 2025; 3271:060002. DOI: 10.1063/5.0251912

Received October 20, 2025.

Adopted in revised form on December 19, 2025.

Approved for publication on December 24, 2025.

**BI O N O T E S :** **Sergey G. Saiyan** — research fellow at the A.B. Zolotov Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures, and Complexes, senior lecturer at the Department of Structural and Theoretical Mechanics, lecturer at the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; junior research fellow; **Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS)**; build. 1, 101 Vernadsky ave., Moscow, 119526, Russian Federation; SPIN-code: 3337-7862, ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; berformert@gmail.com;

**Anastasia A. Marasanova** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; marasanova2004@gmail.com;

**Ksenia D. Ivanchenko** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ivanchenko.ksenia@gmail.com;

**Konstantin A. Modestov** — senior lecturer of the Department of General and Applied Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; junior researcher at the International Scientific Center for Fundamental Research in the Field of Natural and Construction Sciences named after Honored Scientist of the Russian Federation Professor Yu.A. Rossikhin; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20 let Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation; SPIN-code: 6850-4620, ID RSCI: 635355, Scopus: 57202800599, ResearcherID: C-9948-2016, ORCID: 0000-0003-4596-2652; ModestovKA@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Sergey G. Saiyan* — scientific supervision, research concept development, research methodology, analysis of research results, article writing, scientific text editing, and final conclusions.

*Anastasia A. Marasanova* — article writing, calculations in MapleSoft.

*Ksenia D. Ivanchenko* — article writing, calculations in MapleSoft.

*Konstantin A. Modestov* — development of the mathematical model, scientific text editing.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.219-232

## Особенности расчета деревокомпозитных стеновых диафрагм с упругоподатливыми элементами крепления обшивки

Егор Вячеславович Попов<sup>1</sup>, Денис Александрович Столыпин<sup>1</sup>,  
Олег Вадимович Копров<sup>1</sup>, Борис Васильевич Лабудин<sup>1</sup>,  
Сергей Владимирович Усанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ);  
г. Архангельск, Россия;

<sup>2</sup> Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); г. Краснодар, Россия;

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры  
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследуются деревокомпозитные стеновые панели, работающие под действием сдвигающей нагрузки, сдвиговая жесткость которых обусловлена включением обшивок за счет соединения их с каркасом упругоподатливыми связями сдвига. Предложена численная методика расчета прочности элементов каркаса, определена величина перемещений и приведенного модуля сдвига панели с учетом изменения коэффициента жесткости в зависимости от направления результирующего вектора деформации сдвиговых связей относительно направления волокон деревянных ребер каркаса.

**Материалы и методы.** Метод решения задачи базируется на вариационном принципе строительной механики, а именно — минимуме общей потенциальной энергии системы в деформированном состоянии. Деформация системы описывается двумя независимыми параметрами: углами поворота граней обшивки относительно оси горизонтальных и вертикальных ребер. Через данные параметры выражается потенциальная энергия деформации коннекторов, изгиба деревянных ребер каркаса и работа внешней сдвигающей силы, приложенной в уровне верхней обвязки. Сумма данных углов и угла сдвига обшивок дает угол наклона стоек к вертикальной оси, через который определяется величина деформации сдвига панели.

**Результаты.** Представлен расчет трехслойной деревокомпозитной стеновой панели. Рассматривается симметричная относительно срединной плоскости стеновая панель 1,5 × 3 м с двухсторонней обшивкой из листов фанеры конструкционной толщиной 12 мм, крепление которой к деревянным ребрам выполняется податливыми механическими связями. Показано применение итерационного подхода для определения реальных коэффициентов жесткости коннекторов. Установлено, что величина сдвига в значительной мере зависит от жесткости связей и практически не зависит от размеров поперечного сечения деревянных ребер каркаса.

**Выводы.** Стеновые панели с достаточно жесткими часто установленными связями сдвига могут обладать значительной сдвиговой жесткостью и использоваться в качестве вертикальных диафрагм как альтернатива массивным и дорогостоящим панелям из перекрестно-клееной древесины (Cross-Laminated Timber — CLT) и массивным деревянным панелям (Massiv-Holz-Mauer — МНМ) при строительстве зданий малой и средней этажности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** деревянные здания, стеновые диафрагмы, деревокомпозитные материалы, плитно-ребристые панели, податливые соединения, усилие сдвига, сдвиговая жесткость, численные методы, итерационный подход, энергия деформации

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Попов Е.В., Столыпин Д.А., Копров О.В., Лабудин Б.В., Усанов С.В. Особенности расчета деревокомпозитных стеновых диафрагм с упругоподатливыми элементами крепления обшивки // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 219–232. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.219-232

Автор, ответственный за переписку: Денис Александрович Столыпин, stolypin.denis.a@yandex.ru.

## Calculation of wood composite wall diaphragms with elastic-plastic fastening elements for cladding

Egor V. Popov<sup>1</sup>, Denis A. Stolypin<sup>1</sup>, Oleg V. Koproov<sup>1</sup>, Boris V. Labudin<sup>1</sup>,  
Sergey V. Usanov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU);  
Arkhangelsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Kuban State Technological University (KubSTU); Krasnodar, Russian Federation;

<sup>3</sup> Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture  
and Construction Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Timber-composite wall panels operating under the shear load are studied, the shear stiffness of which is due to the inclusion of sheathing due to their connection with the frame by semi-rigid deformable shear bonds. A numerical method for calculating the strength of the frame elements is proposed, determining the magnitude of displacements and the reduced shear modulus of the panel, taking into account the change in the stiffness coefficient depending on the direction of the resulting deformation vector of shear ties relative to the direction of the fibers of the wooden ribs of the frame.

**Materials and methods.** The method of solving the problem is based on the variational principle of structural mechanics, namely, the minimum of the total potential energy of the system in the deformed state. The deformation of the system is described by two independent parameters: the rotation angles of the cladding faces relative to the axis of horizontal and vertical ribs. These parameters are used to express the potential energy of deformation of the connectors, bending of the wooden ribs of the frame and the work of the external shear force applied at the level of the upper strapping. The sum of these angles and the shear angle of the sheathing gives the angle of inclination of the racks to the vertical axis, through which the magnitude of the panel shear deformation is determined.

**Results.** The calculation of a three-layer timber-composite wall panel is presented. A symmetrical wall panel with a size of 1.5 × 3 m with a double-sided sheathing made of plywood sheets with a structural thickness of 12 mm is considered, the fastening of which to the wooden ribs is carried out by flexible mechanical connections. The application of an iterative approach to determine the real stiffness coefficients of the connectors is shown. It is found that the magnitude of shear depends to a large extent on the stiffness of the bonds and practically does not depend on the dimensions of the cross-section of the wooden ribs of the frame.

**Conclusions.** Wall panels with sufficiently rigid, frequently installed shear ties can have significant shear stiffness and can be used as vertical diaphragms as an alternative to massive and expensive CLT and MHM panels in the construction of low- and mid-rise timber buildings.

**KEYWORDS:** wooden buildings, wall diaphragms, timber-composite materials, plate-ribbed panels, semi-rigid connections, shear force, shear stiffness, numerical methods, iterative approach, energy of deformation

**FOR CITATION:** Popov E.V., Stolypin D.A., Koprov O.V., Labudin B.V., Usanov S.V. Calculation of wood composite wall diaphragms with elastic-plastic fastening elements for cladding. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):219-232. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.219-232 (rus.).

*Corresponding author:* Denis A. Stolypin, stolypin.denis.a@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение деревянных конструкций [1] давно не ограничивается малоэтажным домостроением [2, 3], строительство многоэтажных зданий из древесины набирает все большую популярность благодаря прогрессу в производстве инженерных деревянных изделий, способов их соединений и разработке новых эффективных систем пожаротушения [4–7].

Ряд исследований посвящен включению обшивки в качестве сжатой полки древокомпозитных ребристых панелей при работе на изгиб [4, 8]. Имеются также теоретические труды, в которых изучается эффект от включения обшивки в качестве полки при расчете на устойчивость сжатых стеновых панелей [9].

Вертикальные стены — диафрагмы жесткости выполняют ключевую роль в обеспечении устойчивости зданий с каркасной и стеновой конструктивной схемой. Они служат основными элементами, способствующими равномерному распределению нагрузок и повышению жесткости конструкции. При сильных ветрах жесткие, рационально расположенные диафрагмы позволяют обеспечить требуемый уровень динамической комфортности в жилых и административных зданиях, а в условиях сейсмической активности могут помочь предотвратить чрезмерные деформации и разрушения каркаса.

Вопросам расчета и проектирования стеновых панельных конструкций из древесины и элементов на ее основе посвящены отечественные и зарубежные работы.

Целью исследования [10] было определение жесткости, прочности и способности поглощать энергию в новых сотовых сэндвич-панелях, изготовленных из бука с овальными ячейками ауксетического сердечника.

Описывается оценка возможности использования соединителей шпоночного типа, работающих на срез при сборке жестких вертикальных соединений, как альтернативы традиционным крепежным элементам штифтового типа с коротким шагом [11]. Механическое поведение двух типов жестких шпоночных соединений изучалось в ходе экспериментальной кампании, проведенной на уровне соединений и стен.

В работе [12] приведены результаты конечно-элементного анализа многопанельных модулей несущих стен из перекрестно-клееной древесины (CLT) с внутримодульными соединениями (потайные соединения с наклонными винтами), нагруженных монотонными и циклическими силами в плоскости.

Выполнена оценка потенциальных преимуществ внедрения системы сборной стены с торцевыми колоннами (PreWEC), изготовленной из перекрестно-клееной древесины, соединенной со стальными колоннами в здании со стале-деревянными полами легкого типа [13].

Представлены результаты циклических испытаний соединителя между полом и стеной на сдвиг, при этом все испытания соединителя на отрыв завершились разрушением пластинчатого соединения. Итоги сравнивались с предыдущими испыта-

ниями CLT, которые применялись для валидации методики соединения и проектирования [14].

Статья [15] посвящена изучению изгибных характеристик CLT-панелей с бесклеевыми торцевыми соединениями при четырехточечных испытаниях на изгиб. Численные модели экспериментально испытанных CLT-панелей были построены с использованием конечно-элементного программного обеспечения.

Проведены эксперименты для расширения знаний о двухслойных несущих стенах [16]. Они состояли из тестирования восьми полноразмерных конфигураций методом испытания на устойчивость к сдвигу с монотонной нагрузкой. Материалы обшивки включали несущие и ненесущие гипсокартонные листы и древесно-стружечные плиты, склеенные смолой.

Исследование [17] направлено на улучшение понимания поведения легких каркасных деревянных несущих стен с диагональной обшивкой посредством экспериментальных и численных исследований. Осуществлено шесть полноразмерных испытаний несущих стен при монотонной и циклической нагрузках. Для изучения распределения упругих внутренних сил в досках и элементах деревянного каркаса была реализована численная модель конечных элементов. Очевидно, что основная доля исследований, в том числе касательно работы на сдвиг в качестве диафрагм жесткости, ориентирована на изучение стен из CLT. Несмотря на относительно высокую прочность и жесткость этого материала, применение CLT-панелей в строительстве деревянных зданий в России не становится массовым, в первую очередь, из-за значительной стоимости этого материала. Цена на CLT-продукцию существенно превышает стоимость традиционных деревянных изделий, таких как брус, доска, листовые древесные материалы.

В условиях ограниченных бюджетов и растущей конкуренции на строительном рынке застройщикам приходится выбирать более доступные альтернативы. Легкие ребристые стеновые панели на деревянном каркасе с обшивками из деревокомпозитных материалов, таких как ориентированно-стружечная плита (OSB) [18], фанера, цементно-стружечные плиты (ЦСП), гипсоволокнистые плиты (ГФВ) [19], могут оказывать относительно высокое сопротивление сдвигающим нагрузкам и тем самым выполнять роль вертикальных диафрагм жесткости в деревянных зданиях не только малой, но и средней этажности. Обшивки в таких панелях крепятся к обеим сторонам деревянного каркаса гвоздями [20, 21], винтами [22] или скобами [23].

Особенностью данных панелей в деревянном исполнении служит тот факт, что ввиду анизотропных качеств древесины невозможно заранее установить действительный угол наклона результирующих усилий в связях сдвига, скрепляющих обшивки и ребра,

относительно волокон древесины. Это будет в значительной мере влиять на величину податливости каждой отдельно взятой связи и, как следствие, на жесткость целой конструкции при действии на панель сдвигающей нагрузки.

Цель настоящего исследования — разработка «точной» численно-аналитической методики расчета плитно-ребристых стеновых панелей при работе на сдвиг, принимающей во внимание влияние угла наклона векторов усилий в связях сдвига на величину податливости дискретных связей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе нагружения горизонтальной силой  $T$  каркас панели размерами  $2B \times 2H$  деформируется и происходит его перекося (в том числе относительно контура обшивки), что обусловлено сдвигом обшивки и сдвиговыми деформациями податливых механических соединений (рис. 1).

В основу расчета положен принцип минимума потенциальной энергии системы в деформированном состоянии, для чего вводятся неизвестные искомые перемещения:  $\alpha_1$  — угол поворота обшивки относительно горизонтальных ребер каркаса;  $\alpha_2$  — то же относительно вертикальных ребер;  $\alpha_3$  — угол наклона вертикальных ребер каркаса к оси  $z$ . Вводится ряд допущений:

- обшивка испытывает только сдвиговые деформации, ребра каркаса испытывают только деформации изгиба;
- усилия сдвига раскладываются на две составляющие — вдоль и ортогонально к направлению к волокнам, усилия в связях сдвига пропорциональны произведению коэффициента жесткости на величину перемещения по соответствующему направлению;
- перемещения и углы поворота малы, следовательно, справедливо равенство  $\sin \alpha \approx \alpha$  ( $\alpha$  в радианах);
- узлы соединения элементов каркаса — идеально шарнирные;
- панель имеет две плоскости симметрии, проходящие через центр тяжести обшивки; так же панель симметрична относительно своей срединной плоскости, т.е. реакции в связях по обе стороны от деревянного каркаса взаимно уравниваются, не вызывая изгиба ребер из плоскости панели и их депланацию.

Расчет производится итерационным методом на каждой итерации для угловых коннекторов, для каждого коннектора на горизонтальных и вертикальных ребрах уточняется угол наклона результирующего вектора деформации к волокнам древесины и коэффициент жесткости соединения. Итерационный процесс прекращается при достижении требуемого показателя точности (1–5 %), определяемого как относительная

разность значений величины сдвига панели, полученных на текущей и предшествующей итерации.

Полная энергия деформации стеновой панели выражается формулой:

$$\Pi = \Sigma U - A_T, \tag{1}$$

где  $\Sigma U$  — потенциальная энергия внутренних сил;  $A_T$  — работа сдвигающей силы  $T$ .

Потенциальная энергия внутренних сил складывается из энергии деформации деревянных ребер каркаса  $U_{реб}$ , энергии деформации связей сдвига, крепящих обшивку  $U_{св}$ , и энергии деформации обшивки  $U_{обш}$ .

Потенциальная энергия деформации коннекторов, расположенных в местах пересечения вертикальных и горизонтальных ребер, определяется по формуле:

$$\Sigma U_{кон,0} = \frac{1}{2} \cdot n_{об} \cdot 4 \cdot k_{0,рез} \times \left[ (\alpha_1 \cdot B)^2 + (\alpha_2 \cdot H)^2 \right], \tag{2}$$

где  $n_{об}$  — количество обшивок ( $n_{об} = 2$ );  $k_{0,рез}$  — результирующий коэффициент жесткости угловых

коннекторов, принимаемый в зависимости от угла наклона вектора деформации коннектора относительно волокон древесины, полученного на предшествующей итерации расчета.

Потенциальная энергия деформации промежуточных коннекторов устанавливается по более сложному алгоритму, так как зависит не только от углов поворота обшивки относительно осей  $X$  и  $Z$ , но и от их прогибов ребер в местах расположения коннекторов, создаваемых реакциями в них. Для этого необходимо рассмотреть горизонтальные и вертикальные ребра как балки, шарнирно опертые в местах сопряжения между собой, нагруженные рядом сосредоточенных сил в местах установки коннекторов и вызывающие изгиб ребер в плоскости панели.

Проекции усилий в связях сдвига на ось ребра, на котором они расположены, будут равны, так как осевые деформации ребер не учитываются. Расстояния между сосредоточенными силами равны шагу установки коннекторов, который принимается постоянным: через  $S_H$  обозначен шаг коннекторов на горизонтальных ребрах, через  $S_V$  — на вертикальных.

Перемещение ребра поперек оси в точке  $i$  от действия единичного усилия  $\vec{F} = 1$ , приложенного в той же точке, рассчитывается следующим образом:

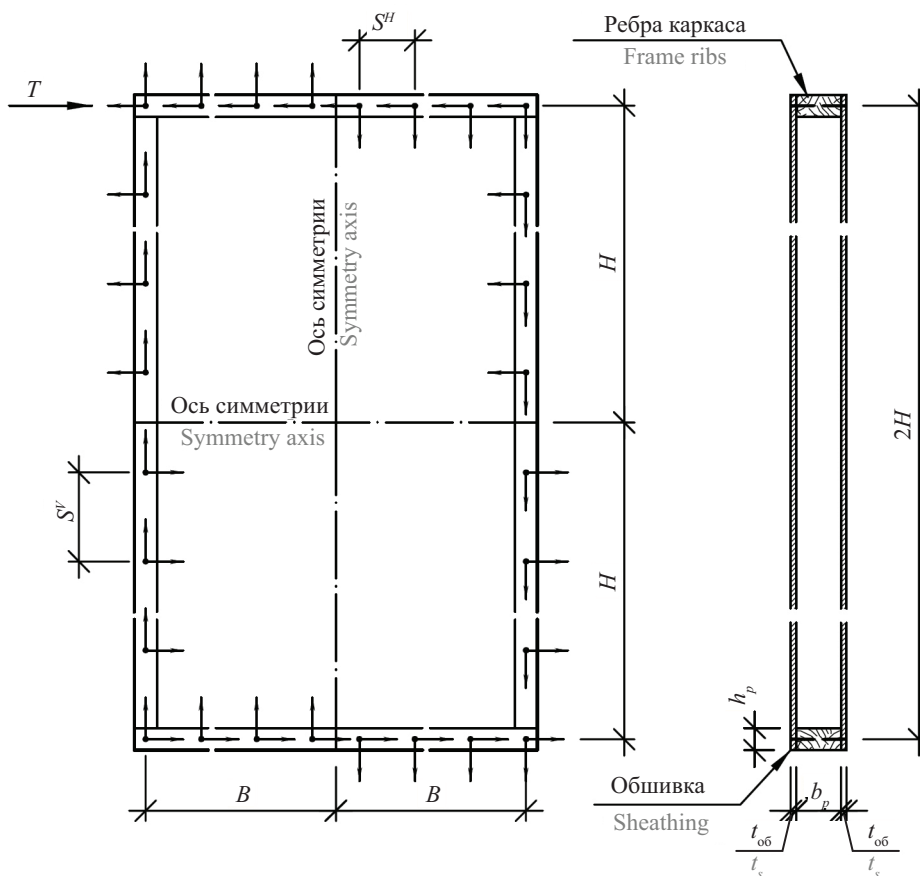


Рис. 1. Схема панели с основными размерами и ориентация компонент усилий в связях сдвига при действии сдвигающей силы  $F$

Fig. 1. Diagram of the panel with the main dimensions and orientation of the force components in the shear connections under the action of the shear force  $F$

$$\delta_{ii}^H = -\frac{B^2 (iS_H)^2 - 2B (iS_H)^3 + (iS_H)^4}{3 \cdot B \cdot EI_H};$$

$$\delta_{ii}^V = -\frac{H^2 (iS_V)^2 - 2H (iS_V)^3 + (iS_V)^4}{3 \cdot H \cdot EI_V}, \quad (3)$$

а перемещение в точке  $i$  от действия единичного усилия в точке  $j$  по формуле:

$$\delta_{ij}^H = -\frac{(iS_H)^3 \cdot (B - jS_H)^3 - iS_H \times \times (2B^2 jS_H - 3B(jS_H)^2 + (jS_H)^3)}{6 \cdot B \cdot EI_H}; \quad (4)$$

$$\delta_{ij}^V = -\frac{(iS_V)^3 \cdot (H - jS_V)^3 - iS_V \times \times (2H^2 jS_V - 3H(jS_V)^2 + (jS_V)^3)}{6 \cdot H \cdot EI_V}. \quad (5)$$

Индексы  $H$  и  $V$  указывают на принадлежность параметра к горизонтальному или вертикальному ребру. Выражения (4) и (5) справедливы при  $i \leq j$ . Стоит отметить, что согласно теореме Максвелла  $\delta_{ij} = \delta_{ji}$ , таким образом определяются значения недостающих коэффициентов.

Через  $k_{i,рез}$  обозначим результирующий коэффициент жесткости промежуточных коннекторов, который может быть вычислен, если известны компоненты его деформации на оси  $X$  и  $Z$ ;  $k_{i,0}$  и  $k_{i,90}$  — проекции результирующего коэффициента жесткости на ось, параллельную оси деревянного ребра и ортогональную ей соответственно.

Проекция усилия в связи сдвига в точке  $i$  на ось, ортогональную оси ребра, пропорциональна величине деформации связи  $\Delta_{i,X}^H$  ( $\Delta_{i,Z}^V$ ), которая состоит из деформации, обусловленной поворотом обшивки относительно ребра на углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (относительно горизонтальных и вертикальных ребер соответственно), и деформации, обусловленной прогибами ребра как изгибаемого элемента конечной жесткости (рис. 2), т.е.:

$$\Delta_{i,Z}^H = \alpha_1(B - iS_H) - f_i \rightarrow F_i = k_{i,90}[\alpha_1(B - iS_H) - f_i]; \quad (6)$$

$$\Delta_{i,X}^V = \alpha_2(H - iS_V) - f_i \rightarrow F_i = k_{i,90}[\alpha_2(H - iS_V) - f_i], \quad (7)$$

где  $k_{i,90}$  — проекция коэффициента жесткости коннектора на ось, ортогональную направлению волокон древесины (продольной оси ребра).

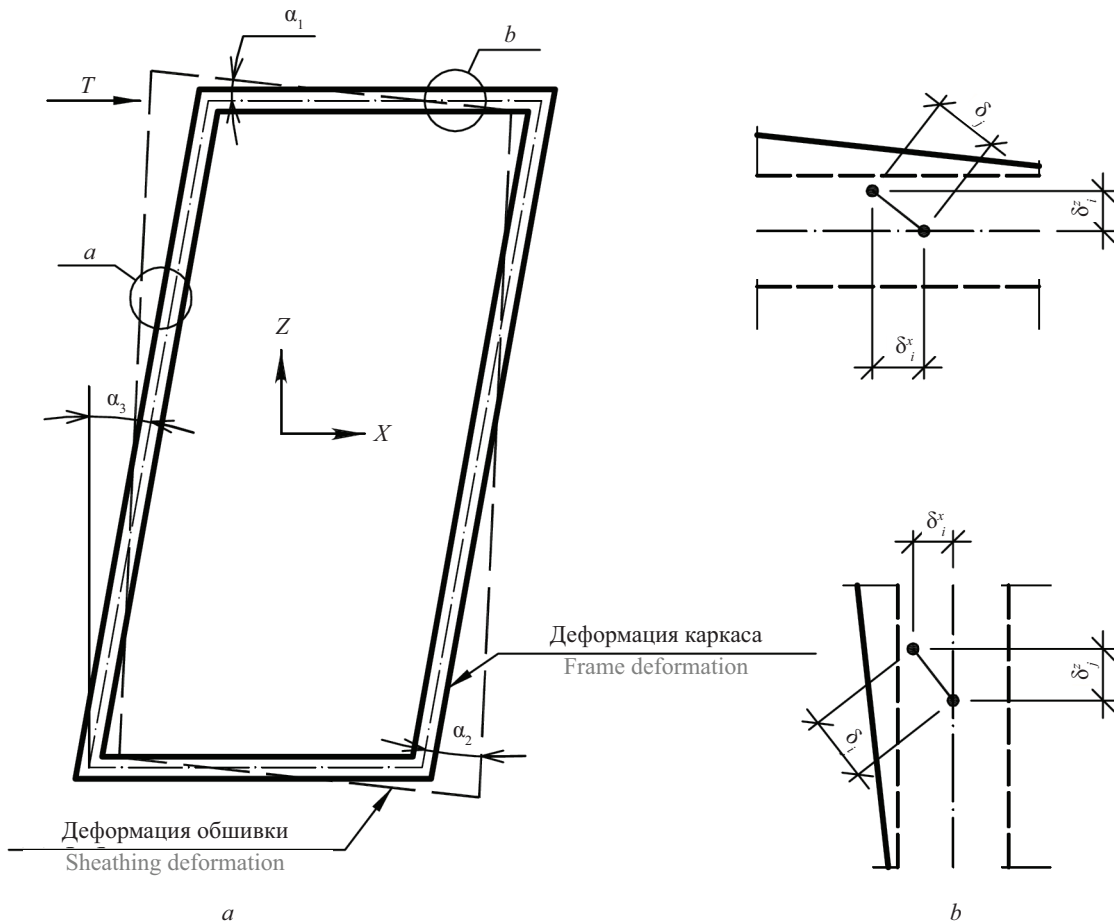


Рис. 2. Общая схема деформации (а) и деформация коннекторов при сдвиге стеновой панели (б)

Fig. 2. General scheme of deformation (a) and deformation of connectors when the wall panel is shifted (b)

Для того чтобы выразить прогибы ребер в точках расположения связей, сдвиги  $f_i$ , необходимо составить систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1 = \delta_{11}F_1 + \delta_{12}F_2 + \dots + \delta_{1m}F_m \\ f_2 = \delta_{21}F_1 + \delta_{22}F_2 + \dots + \delta_{2m}F_m \\ \dots \\ f_m = \delta_{m1}F_1 + \delta_{m2}F_2 + \dots + \delta_{mm}F_m \end{cases} \quad (8)$$

Подстановка правой части (6) в систему (8) дает возможность выразить прогибы ребра  $f_i$  через  $\alpha_1$  и подставить полученные уравнения в левую часть (6) для выражения поперечных компонент деформации коннекторов через  $\alpha_1$ .

Для вертикального ребра составляется аналогичная система с заменой  $m$  на  $n$ ,  $\alpha_1$  на  $\alpha_2$ ,  $B$  на  $H$  и т.д.

Проекция неизвестного вектора деформации коннекторов на ось ребра, на котором расположены коннекторы, может быть выражена через те же параметры  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  с учетом того, что эта компонента деформации для всех коннекторов в пределах ребра одинакова:

$$\delta_{j,z}^V = \alpha_1 \cdot H; \quad \delta_{i,x}^H = \alpha_2 \cdot B, \quad (9)$$

где  $\delta_{j,z}^V$  — проекция вектора деформации  $j$ -го коннектора на вертикальном ребре на ось  $Z$ ;  $\delta_{i,x}^H$  — проекция вектора деформации  $i$ -го коннектора на горизонтальном ребре на ось  $X$ .

Величина полной деформации коннектора определяется как корень из суммы квадратов проекций деформации на оси  $X$  и  $Z$ :

$$\begin{aligned} \delta_i^H &= \sqrt{(\delta_{i,x}^H)^2 + (\delta_{i,z}^H)^2}; \\ \delta_j^V &= \sqrt{(\delta_{j,x}^V)^2 + (\delta_{j,z}^V)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Потенциальная энергия деформации всех коннекторов, за исключением угловых, рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \sum U_{\text{кон},i,j} &= \frac{n_{\text{об}}}{2} \left( 4 \sum_{i=1}^{m-1} \left[ \vec{k}_{\text{кон},i} (\delta_i^H)^2 \right] + \right. \\ &+ 4 \sum_{j=1}^{n-1} \left[ \vec{k}_{\text{кон},j} (\delta_j^V)^2 \right] + 2 \vec{k}_{\text{кон},m} (\delta_m^H)^2 + \\ &\left. + 2 \vec{k}_{\text{кон},n} (\delta_n^V)^2 \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где за  $m$ -й и  $n$ -й принимаются коннекторы, расположенные посередине вертикальных и горизонтальных ребер соответственно.

Потенциальная энергия деформации горизонтальных и вертикальных ребер устанавливается через функции изгибающего момента на участках ребер между связями сдвига:

$$\begin{aligned} \sum U_{\text{реб}} &= \sum_{i=1}^m \int \frac{M_i^2}{2EI} dx_i = \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{1}{2EI} \int (V_0 [(i-1)S + x_i] - \\ &- \sum_{k=1}^{i-1} F_k [(i-(k+1))S + x_i])^2 dx_i, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $V_0$  — фиктивная опорная реакция, возникающая при рассмотрении ребра как шарнирно опертой балки на ее опоре (в точке сопряжения ребер), определяемая по формуле:

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^m F_i \cdot 2(B - iS)}{2B}. \quad (13)$$

Потенциальная энергия деформации обшивки рассчитывается следующим образом:

$$U_{\text{обш}} = 2 \cdot B \cdot H \cdot \Sigma t_{\text{об}} \cdot G_{\text{об}} \cdot (\alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1)^2, \quad (14)$$

где  $G_{\text{об}}$  — модуль сдвига материала обшивок в плоскости панели.

Работа силы  $T$  выражается:

$$\begin{aligned} A_T &= T \cdot 2H \times \\ &\times \left( \alpha_1 + \alpha_2 + \frac{T}{2B \cdot n_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot G_{\text{об}}} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение для потенциальной энергии деформации системы как функции неизвестных углов поворота каркаса относительно обшивки имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi(\alpha_1, \alpha_2) &= \Sigma U_{\text{св,уг}} + \Sigma U_{\text{св,пр}} + \Sigma U_{\text{реб}} + \\ &+ 2U_{\text{обш}} - A_T. \end{aligned} \quad (16)$$

Для определения значений параметров, сообщающих минимум функции  $\Pi(\alpha_1, \alpha_2)$ , составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_1} = 0 \\ \frac{\partial \Pi(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_2} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Рассчитывается угол наклона вертикальных стоек каркаса к вертикальной оси  $\alpha_3$ :

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2 + \frac{T}{2B \cdot n_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot G_{\text{об}}}. \quad (18)$$

Устанавливается величина сдвиговой деформации деревянного каркаса в уровне верхней обвязки с учетом малости деформаций:

$$\Delta_{\text{сдв}} = H \cdot \sin \alpha_3 \approx H \cdot \alpha_3. \quad (19)$$

Для практических расчетов зданий со стеновой конструктивной системой, основными элементами которой, воспринимающими горизонтальные воздействия, являются плитно-ребристые стеновые панели, может быть рекомендован к использованию приведенный модуль сдвига, позволяющий укрупненно рассматривать эти панели как сплошные ортотропные пластинки. Величина приведенного модуля сдвига определяется по формуле:

$$G_{\text{ред}}^K = \text{tg} \alpha_3 \frac{T}{2H} \approx \frac{\alpha_3 T}{2H}. \quad (20)$$

Данный алгоритм может быть применен при расчете, когда необходимо производить учет физической нелинейности материала и работы связей сдвига. При этом на каждой итерации следует уточнять изгибную жесткость ребер и коэффициент жесткости связей сдвига по соответствующим зависимостям « $E_d - \varepsilon_d$ » и « $k_{\text{кон}} - \delta_{\text{кон}}$ ».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера проанализирована стеновая панель размерами  $1,5 \times 3$  м ( $B \times H$ ) на деревянном каркасе из досок класса С20 с шарнирными узлами и двухсторонней обшивкой. Рассматриваются двухсторонние обшивки из фанеры конструкционной (ФК) ГОСТ 3916.1–2018, толщина обшивки  $t_{об} = 12$  мм; величина сдвигающей силы  $T = 10$  кН.

Модуль Юнга древесины С20 (СП 64.13330):  $EI = 6,4 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 5,12 \cdot 10^6$  кПа.

Модуль сдвига обшивки из ФК (СП 64.13330):  $G_{об} = 750 \cdot 10^3$  кПа.

По результатам исследования полномасштабных моделей панелей на деревянном каркасе [24] установлено, что жесткость связей оказывает существенное влияние на их сдвиговую жесткость. Пределы варьирования жесткости коннекторов назначаются согласно результатам испытаний образцов соединений, полученным в ряде работ [21–23]: при  $\alpha_{н.в} = 0^\circ$   $k_0 = 100–1000$  кН/мм.

Руководствуясь табл. 19 СП 64.13330, можно принять  $k_{90} \approx 1/2k_0$ . Для промежуточных значений угла наклона волокон древесины относительно вектора прикладываемого усилия коэффициент жесткости может уточняться по зависимости П.А. Дмитриева – Ю.Д. Стрижакова:

$$k_{\alpha_{н.в}} = \frac{k_{\alpha=0}}{1 + \left( \frac{k_{\alpha=0}}{k_{\alpha=90}} - 1 \right) \sin^3 \alpha_{н.в}}, \quad (21)$$

где  $\alpha_{н.в}$  — угол между направлением волокон древесины и вектором прикладываемого усилия.

Потенциальная энергия деформации угловых коннекторов определяется по формуле (2):

$$\sum U_{св,уг} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4 \cdot k_{кон} \times [0,563 \cdot \alpha_1^2 + 2,25 \cdot \alpha_2^2].$$

Коэффициенты матрицы жесткости для горизонтальных ребер устанавливаются по формулам (3), (4). Для ребер сечением  $50 \times 150$  мм:  $\delta_{11} = \delta_{22} = 0,868 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{12} = \delta_{21} = 0,795 \cdot 10^{-3}$ .

Подставляя данные коэффициенты в систему (8) и решая ее, получаем выражения для прогибов ребер  $f_i$  в виде:

$$f_1^H = \frac{1,776 \cdot 10^4 \cdot \bar{k}_1 \cdot \alpha_1 + 7,77 \cdot 10^3 \cdot \bar{k}_2 \cdot \alpha_1 - 3,963 \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 \cdot \alpha_1}{3,552 \cdot 10^4 \cdot (\bar{k}_1 + \bar{k}_2) - 7,393 \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 - 4 \cdot 10^7};$$

$$f_2^H = \frac{3,108 \cdot 10^4 \cdot \bar{k}_1 \cdot \alpha_1 + 1,776 \cdot 10^4 \cdot \bar{k}_2 \cdot \alpha_1 - 3,696 \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 \cdot \alpha_1}{7,104 \cdot 10^4 \cdot (\bar{k}_1 + \bar{k}_2) - 14,785 \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 - 8 \cdot 10^7}$$

Величина деформации коннекторов поперек оси ребра согласно формуле (6):

$$\Delta^H_{1,z} = 0,5\alpha_1 - f_1^H; \Delta^H_{2,z} = 0,25\alpha_1 - f_2^H;$$

$$F_1 = k_{1,90}(0,5\alpha_1 - f_1^H); F_2 = k_{2,90}(0,25\alpha_1 - f_2^H).$$

По формуле (11) определяется фиктивная опорная реакция:

$$V_0^H = \frac{2}{3}F_1 + \frac{1}{3}F_2.$$

Далее можно выразить потенциальную энергию деформации ребер по формуле (10):

$$\sum U_{реб}^H = \frac{1}{16} \int_0^{0,25} \left( \frac{2F_1 + F_2}{3} x_1 \right)^2 dx_1 + \frac{1}{16} \int_0^{0,25} \left( \frac{2F_1 + F_2}{3} [0,25 + x_2] - F_1 x_2 \right)^2 dx_2 + \frac{1}{16} \int_0^{0,25} \left( \frac{2F_1 + F_2}{3} [0,5 + x_3] - F_1 [0,25 + x_3] - F_2 x_3 \right)^2 dx_3.$$

Затем необходимо произвести эти расчеты для вертикальных ребер. Коэффициенты матрицы жесткости для ребер сечением  $50 \times 150$  мм:  $\delta_{11} = \delta_{44} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{22} = \delta_{33} = 8,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{34} = \delta_{43} = 5,062 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{13} = \delta_{31} = \delta_{24} = \delta_{42} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{14} = \delta_{41} = 2,587 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{23} = \delta_{32} = 7,65 \cdot 10^{-3}$  подставляются в систему уравнений (8), а силы  $F_i$  выражаются через деформации коннекторов по формуле (7). В случае символического представления коэффициентов жесткости  $k_i$  при числе неизвестных  $m \geq 3$  решение получается достаточно громоздким, поэтому удобно представить его в виде частного двух многочленов (число коэффициентов многочлена в числителе дроби  $m^2 - 1$  и  $m^2$  — многочлена в знаменателе):

$$f_i^V = \frac{a_{i,1} \cdot k_{i,1} \cdot \alpha_2 + a_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot \alpha_2 + a_{i,1} \cdot k_{i,3} \cdot \alpha_2 + a_{i,4} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,5} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot \alpha_2 + a_{i,6} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,3} \cdot \alpha_2 + a_{i,7} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,8} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot \alpha_2 + a_{i,9} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,10} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,11} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot \alpha_2 + a_{i,12} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,13} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,14} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2 + a_{i,15} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} \cdot \alpha_2}{b_{i,1} \cdot k_{i,1} + b_{i,2} \cdot k_{i,2} + b_{i,3} \cdot k_{i,3} + b_{i,4} \cdot k_{i,4} + b_{i,5} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} + b_{i,6} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,3} + b_{i,7} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,4} + b_{i,8} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} + b_{i,9} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,4} + b_{i,10} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} + b_{i,11} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} + b_{i,12} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,4} + b_{i,13} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} + b_{i,14} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} + b_{i,15} \cdot k_{i,1} \cdot k_{i,2} \cdot k_{i,3} \cdot k_{i,4} + b_{i,16}}$$

где  $a_{ik}$  и  $b_{il}$  — числовые коэффициенты, получаемые при решении системы уравнений.

При изначально заданных числовых значениях коэффициентов жесткости  $k_i$  решение системы получается в виде одночленов  $a_i \cdot \alpha$ , однако такой

подход менее удобен при итерационном способе решения задачи.

Фиктивная опорная реакция выражается через силы  $F_i$  по формуле (11):

$$V_0^V = 0,8F_1 + 0,6F_2 + 0,4F_3 + 0,2F_4.$$

Потенциальная энергия деформации ребер выражается по формуле (10):

$$\Sigma U_{\text{реб}}^V = \frac{1}{16} \left[ \int_0^{0,3} (V_0^V x_1)^2 dx_1 + \int_0^{0,3} (V_0^V [0,3 + x_2] - F_1 x_2)^2 dx_2 + \int_0^{0,3} (V_0^V [0,6 + x_3] - F_1 [0,3 + x_3] - F_2 x_3)^2 dx_3 + \int_0^{0,3} (V_0^V [0,9 + x_4] - F_1 [0,6 + x_4] - F_2 [0,3 + x_4] - F_3 x_4)^2 dx_4 + \int_0^{0,3} (V_0^V [1,2 + x_5] - F_1 [0,9 + x_5] - F_2 [0,6 + x_5] - F_3 [0,3 + x_5] - F_4 x_5)^2 dx_5 \right]$$

На примере коннекторов с жесткостью  $k_0 = 200$  кН/м и  $k_{90} = 100$  кН/м подробно рассмотрен итерационный процесс. Для этого составлена таблица.

Для оценки влияния на сдвиг панели таких факторов, как размеры поперечного сечения ребра и коэффициент жесткости связей сдвига, произведена серия расчетов панели, остальные параметры назначались как в вышеприведенном примере. Рассмотрены следующие размеры поперечного сечения ребра ( $b \times h$ ), мм: 25 × 150; 50 × 150; 75 × 150; 100 × 150; 125 × 150; 150 × 150. Жесткость связей  $k_0$  рассмотрена в интервале  $k_0 = 100-1000$  кН/м с градацией 50 кН/м, как и ранее, принималось  $k_{90} = 0,5k_0$ . Очевидно, что такой параметр, как толщина обшивки, не будет вносить существенных изменений в конечный результат расчета (ввиду относительно высокой сдвиговой жесткости даже при малой ее толщине) и в расчетах не варьировался. Результаты расчета представлены на графиках зависимости « $k_0 - \Delta_{\text{сдв}}$ » (рис. 3).

По результатам расчета установлено, что наиболее существенное влияние на величину перекоса деревокомпозитной стеновой панели оказывает жесткость связей сдвига, при увеличении которой в вышеуказанных пределах величина деформации сдвига снижалась в 8,8–8,9 раз.

Пример расчета — итерационный процесс для случая панели с ребрами сечением 50 со связями сдвига жесткостью  $k_0 = 200$  и  $k_{90} = 100$

Calculation example — iterative process for the case of a panel with ribs of section 50 with shear bonds of stiffness  $k_0 = 200$  and  $k_{90} = 100$

Итерация Iteration	Связи сдвига Shear bonds		$k_0$ , кН/м $k_{90}$ , кН/м кН/m	$k_{\text{вх}}$ $k_{\text{in}}^{\text{рез}}$ кН/м кН/m	Параметры деформации схемы Scheme deformation parameters				Показатель точности, % Accuracy rate, %	$\alpha_{\text{наб}} / \alpha_{\text{г.д.}}$ град / deg	$k_{\text{вх}}^{\text{рез}} / k_{\text{вх}}$ кН/м / кН/м
	Расположение Location	Номер Number			$\alpha_1 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\alpha_2 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\alpha_3 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\Delta_{\text{сд}} / \Delta_{\text{сд}}^{\text{н}}$ мм / mm			
1	Угловые Corner	0	200	200	10,01	4,15	14,53	43,6	-	39,65	159
			100								
	Горизонтальное ребро Horizontal rib	1	200	200						47,73	142
			100								
		2	200	200						34,57	169
			100								
		3	200	0						0	0
			100								
	Вертикальное ребро Vertical rib	1	200	200						19,88	192
			100								
		2	200	200						5,22	200
			100								
		3	200	200						19,5	193
			100								
		4	200	200						16,72	195
100											
5		200	0	0	0						
	100										

Окончание табл. / End of the Table

Итерация Iteration	Связи сдвига Shear bonds		$k_0$ , кН/м $k_{90}$ , кН/м кН/м	$k_{in}^{рез}$ , $k_{res}^{рез}$ , кН/м кН/м	Параметры деформации схемы Scheme deformation parameters				Показатель точности, % Accuracy rate, %	$\alpha_{инв} / \alpha_{св}$ , град / deg	$k_{рез}^{вых} / k_{рез}^{инв}$ , кН/м / кН/м
	Расположение Location	Номер Number			$\alpha_1 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\alpha_2 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\alpha_3 \cdot 10^3$ , рад / rad	$\Delta_{св} / \Delta_{св}^{пр}$ , мм / мм			
2	Угловые Corner	0	200	159	11,3	4,98	16,66	49,98	14,6	39,65	155
			100								
	Горизонтальное ребро Horizontal rib	1	200	142						47,73	146
			100								
		2	200	169						34,57	172
			100								
		3	200	0						0	0
			100								
	Вертикальное ребро Vertical rib	1	200	192						19,88	191
			100								
		2	200	200						5,22	200
			100								
		3	200	193						19,5	192
			100								
		4	200	195						16,72	195
100											
5	200	0	0	0							
	100										
3	Угловые Corner	0	200	155	11,31	4,96	16,65	49,94	0,1	41,39	155
			100								
	Горизонтальное ребро Horizontal rib	1	200	146						45,97	146
			100								
		2	200	172						32,94	172
			100								
		3	200	0						0	0
			100								
	Вертикальное ребро Vertical rib	1	200	191						21,03	191
			100								
		2	200	200						5,55	200
			100								
		3	200	192						20,64	192
			100								
		4	200	195						17,72	195
100											
5	200	0	0	0							
	100										

Поперечное сечение деревянных ребер не оказывает значительного влияния на величину сдвига стеновой панели, даже несмотря на многократное увеличение их изгибной жесткости. При переходе от сечения  $25 \times 150$  мм ( $I = 1,95 \cdot 10^{-7}$  м<sup>4</sup>) к сечению  $150 \times 150$  мм ( $I = 4,22 \cdot 10^{-5}$  м<sup>4</sup>), т.е. при повышении изгибной жесткости деревянных ребер в 216 раз, снижение деформаций сдвига составило не более 10 %.

Несмотря на то, что, как было сказано выше, материал обшивки не оказывает прямого влияния на величину деформации панели, стоит отметить,

что для обшивок из более жестких материалов будут характерны более высокие значения коэффициента жесткости соединения, так как полный сдвиг равен сумме сдвигов коннектора в древесине и обшивке. Кроме того, необходимо отметить, что толщина обшивки должна обеспечивать ее местную устойчивость при работе в составе композитного сечения [25].

При абсолютно жесткой связи обшивок и ребер каркаса (клеевое соединение) величина сдвига обусловлена только модулем упругости II рода материала обшивки и ее толщиной. В рассмотренном при-

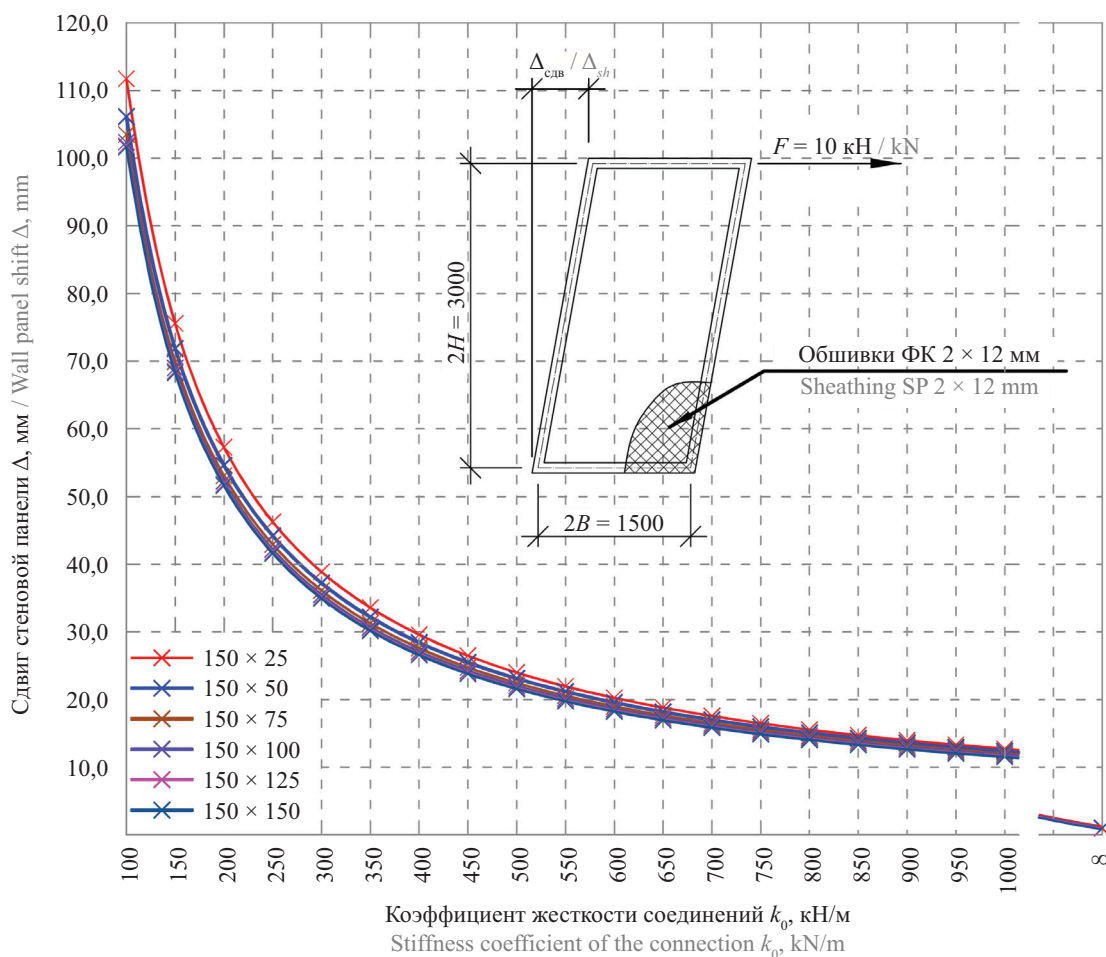


Рис. 3. Графики зависимости «коэффициент жесткости связей – сдвиг» стеновой панели с учетом варьирования размеров поперечного сечения деревянных ребер

Fig. 3. Graphs of the dependence of the “bond stiffness coefficient – shear” of the wall panel, taking into account the variation in the size of the cross-section of wooden ribs

мере величина сдвиговой деформации такой панели составила 1,05 мм, при максимальном рассмотренном значении коэффициента жесткости податливых связей 11,5–12,5 мм (в зависимости от изгибной жесткости ребер). Дальнейшим повышением коэффициента жесткости связей можно еще более существенно повысить жесткость стеновой панели при сдвиге, однако в таком случае потребуются установка специальных сдвиговых коннекторов в виде когтевых шайб [26–29] или двухсторонних металлических зубчатых пластин [30]. Погонная жесткость связей сдвига также может быть повышена за счет уменьшения шага их расстановки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан численно-аналитический алгоритм расчета на сдвиг стеновых панелей на деревянном каркасе с обшивками из листовых материалов и податливыми связями их крепления, позволяющий итерационным путем уточнять коэффициенты жесткости

связей сдвига в зависимости от углов наклона результирующих векторов деформации к волокнам древесины. Алгоритм может быть использован и при необходимости учета физической нелинейности материалов и нелинейной деформации связей сдвига.

Установлено, что приемлемую точность решения ( $\leq 1\%$ ) можно получить путем выполнения 3–4 итераций.

Наибольшее влияние на величину деформаций сдвига стеновых панелей на деревянном каркасе с обшивками из листовых материалов оказывает жесткость связей сдвига, а размеры поперечного сечения деревянных ребер каркаса практически не влияют на данный параметр.

Стеновые панели с достаточно жесткими часто установленными связями сдвига могут обладать значительной сдвиговой жесткостью и применяться в качестве вертикальных диафрагм как альтернатива массивным и дорогостоящим CLT- и МНМ-панелям при строительстве деревянных зданий малой и средней этажности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунтов П.С. Большой строительный словарь. Том 2 : учебное пособие. М. : Издательский дом АСВ, 2022. 626 с. EDN FSAMPR.
2. Pinaykin I.P., Zhadanov V.I., Ukrainchenko D.A. Wooden low-rise construction. New constructive and technological solutions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 751. Issue 1. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/751/1/012092
3. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шубин И.Л., Волкова С.В. Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве : учебное пособие. М. : Издательский дом АСВ, 2023. 420 с. EDN MSLGGU.
4. Жаданов В.И., Украинченко Д.А., Мельников П.П., Семенов М.Ю., Мельникова И.В. Аэродинамичный четырехэтажный жилой дом двухгалерейного типа с ядром из CLT // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 3. С. 30–40. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.30. EDN FNZQFA.
5. Tulebekova S., Malo K.A., Rönquist A., Nàvik P. Modeling stiffness of connections and non-structural elements for dynamic response of taller glulam timber frame buildings // Engineering Structures. 2022. Vol. 261. P. 114209. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114209
6. Ussher E., Aloisio A., Rathy S. Effect of lateral resisting systems on the wind-induced serviceability response of tall timber buildings // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. P. e02540. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02540
7. Aslantamer Ö.N., Ilgin H.E. Space efficiency in timber office buildings // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 91. P. 109618. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109618
8. Chernova T.P., Melekhov V.I. Behavior of timber-timber composite structure connected by inclined screws // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 4 (120). DOI: 10.34910/MCE.120.4. EDN LTHOSP.
9. Лабудин Б.В., Попов Е.В., Гетман Д.В., Столыпин Д.А., Румянцева В.Е. Методика расчета устойчивости ребристых панелей с учетом температурно-влажностного режима технологий текстильного производства // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 2 (404). С. 199–208. DOI: 10.47367/0021-3497\_2023\_2\_199. EDN DQLFTT.
10. Smardzewski J. Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells // Materials & Design. 2019. Vol. 183. P. 108159. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108159
11. Polastri A., Casagrande D. Mechanical behaviour of multi-panel cross laminated timber shear-walls with stiff connectors // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 332. P. 127275. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127275
12. Bhandari S., Fischer E.C., Riggio M., Muszynski L. Numerical assessment of In-plane behavior of multi-panel CLT shear walls for modular structures // Engineering Structures. 2023. Vol. 295. P. 116846. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116846
13. Belleri A., Minkada M.E., Baldassarre D., Palumbo E., Loss C. Preliminary assessment of PreWEC-like systems made by cross-laminated timber panels and steel columns // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 48. Pp. 371–378. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.119
14. Morrell I., Sinha A., Cheney D., Taylor R., Potter F., Way D. et al. Reverse-cyclic performance of United States prescriptive code connectors in a novel mass timber structural composite panel // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. e03524. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03524
15. Ren H., Bahrami A., Cehlin M., Wallhagen M. Proposing new adhesive-free timber edge connections for cross-laminated timber panels: A step toward sustainable construction // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e02975. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e02975
16. Byloos D., Vandoren B. Experimental and analytical assessment of the racking behavior of timber frame walls with single-sided double-layered sheathing panels // Engineering Structures. 2024. Vol. 316. P. 118592. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118592
17. Casagrande D., Setti A., Polastri A. Structural behaviour of light-frame timber shear-walls with diagonal board sheathing // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 416. P. 135077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135077
18. Manser N., Steiger R., Geiser M., Otti M., Frangi A. Shear resistance of Oriented Strand Board panel sheathings in timberframed shear walls // Engineering Structures. 2024. Vol. 316. P. 118461. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118461
19. Dobrila P., Premrov M. Reinforcing methods for composite timber frame–fiberboard wall panels // Engineering Structures. 2003. Vol. 25. Issue 11. Pp. 1369–1376. DOI: 10.1016/S0141-0296(03)00109-3
20. Muñoz W., Salenikovich A. Determination of Yield Point and Ductility of Timber Assemblies: In Search of Harmonised Approach // 10th World Conference on Timber Engineering. 2008. Pp. 1064–1071.
21. Кавелин А.С. Современное положение вопроса расчета нагельных соединений в деревянных стеновых панелях // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 154. EDN YATFYL.
22. Labudin B.V., Popov E.V., Tyurikova T.V., Nikitina T.A., Ruslanova A.V. Experimental Studies of the Strength and Rigidity of Screw Connections of Covers with Wooden Ribs // IOP Conference Series: Mate-

rials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 4. P. 42063. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042063

23. *Hassanieh A., Valipour H.* Experimental and numerical study of OSB sheathed-LVL stud wall with stapled connections // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233. P. 117373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117373

24. *Véliz F., Estrella X., Lagos J., Guindos P.* Testing and nonlinear modelling of industrialized light-frame wooden diaphragms including optimized nailing and nonstructural sheathing // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 297. P. 117017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117017

25. *Labudin B.V., Popov E.V., Sopilov V.V.* Stability of compressed sheathings of wood composite plate-ribbed structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Issue 3. P. 033041. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033041

26. *Черных А.Г., Данилов Е.В., Коваль П.С.* Расчет жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020. № 4 (376). С. 157–167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167. EDN FEWWLQ.

27. *Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdralovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V.* Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear // *Russian Forestry Journal*. 2020. No. 4 (376). Pp. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189. EDN UVWWNN.

28. *Римшин В.И., Лабудин Б.В., Мелехов В.И., Попов Е.В., Рощина С.И.* Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // *Вестник МГСУ*. 2016. № 9. С. 35–50. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.35-50. EDN WMLATP.

29. *Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V.* Calculation of shear stability of conjugation of the main pillars with the foundation in wooden frame buildings // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Pp. 867–876. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_85

30. *Jacquier N., Girhammar U.A.* Evaluation of bending tests on composite glulam-CLT beams connected with double-sided punched metal plates and inclined screws // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95. Pp. 762–773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.137

Поступила в редакцию 29 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 3 декабря 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Егор Вячеславович Попов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; SPIN-код: 5395-2753, РИНЦ ID: 896523, Scopus: 57208305419, ResearcherID: AAY-2235-2020, ORCID: 0000-0002-8950-7558; EPV1989@yandex.ru;

**Денис Александрович Столыпин** — аспирант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; SPIN-код: 2845-6362, РИНЦ ID: 1079070, Scopus: 57208307525, ResearcherID: AES-3773-2022, ORCID: 0000-0003-0153-8729; stolypin.denis.a@yandex.ru;

**Олег Вадимович Копров** — аспирант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; SPIN-код: 1531-5494, РИНЦ ID: 1312676; vorpok28@gmail.com;

**Борис Васильевич Лабудин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; SPIN-код: 6705-1677, РИНЦ ID: 510962, ResearcherID: AAY-2237-2020, ORCID: 0000-0002-2547-3096; sevned@mail.ru;

**Сергей Владимирович Усанов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350042, г. Краснодар, Московская ул., д. 2, стр. 1; старший научный сотрудник лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; SPIN-код: 1144-6400, РИНЦ ID: 1157225, Scopus: 58287097200, ResearcherID: JQW-2943-2023, ORCID: 0000-0002-7395-1641; svusanov@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Rimshin V.I., Ketsko E.S., Truntov P.S. *Big construction dictionary*. Vol. 2 : textbook. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 626. EDN FSAMPR. (rus.).
2. Pinaykin I.P., Zhadanov V.I., Ukrainchenko D.A. Wooden low-rise construction. New constructive and technological solutions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 751(1):012092. DOI: 10.1088/1755-1315/751/1/012092
3. Kurbatov V.L., Rimshin V.I., Shubin I.L., Volkova S.V. *Information modeling and artificial intelligence in modern construction and housing and communal services : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2023; 420. EDN MSLGGU. (rus.).
4. Zhadanov V.I., Ukrainchenko D.A., Melnikov P.P., Semenov M.Yu., Melnikova I.V. Aerodynamic four-storey residential building of two-gallery type with a core of CLT. *Vestnik of Volga State University of Technology Series "Forest. Ecology. Nature Management"*. 2021; 3:3-40. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.30. EDN FNZQFA. (rus.).
5. Tulebekova S., Malo K.A., Rønquist A., Nåvik P. Modeling stiffness of connections and non-structural elements for dynamic response of taller glulam timber frame buildings. *Engineering Structures*. 2022; 261:114209. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114209
6. Ussher E., Aloisio A., Rathy S. Effect of lateral resisting systems on the wind-induced serviceability response of tall timber buildings. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02540. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02540
7. Aslantamer Ö.N., Ilgin H.E. Space efficiency in timber office buildings. *Journal of Building Engineering*. 2024; 91:109618. DOI: 10.1016/j.job.2024.109618
8. Chernova T.P., Melekhov V.I. Behavior of timber-timber composite structure connected by inclined screws. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 4(120). DOI: 10.34910/MCE.120.4. EDN LTHOSP.
9. Labudin B.V., Popov E.V., Getman D.V., Stolypin D.A., Romyantseva V.E. Calculation method of ribbed panels stability considering the temperature and humidity conditions of textile production technologies. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2023; 2(404):199-208. DOI: 10.47367/0021-3497\_2023\_2\_199. EDN DQLFTT. (rus.).
10. Smardzewski J. Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells. *Materials & Design*. 2019; 183:108159. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108159
11. Polastri A., Casagrande D. Mechanical behaviour of multi-panel cross laminated timber shear-walls with stiff connectors. *Construction and Building Materials*. 2022; 332:127275. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127275
12. Bhandari S., Fischer E.C., Riggio M., Muszynski L. Numerical assessment of In-plane behavior of multi-panel CLT shear walls for modular structures. *Engineering Structures*. 2023; 295:116846. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116846
13. Belleri A., Minkada M.E., Baldassarre D., Palumbo E., Loss C. Preliminary assessment of PreWEC-like systems made by cross-laminated timber panels and steel columns. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 48:371-378. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.119
14. Morrell I., Sinha A., Cheney D., Taylor R., Potter F., Way D. et al. Reverse-cyclic performance of United States prescriptive code connectors in a novel mass timber structural composite panel. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21:e03524. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03524
15. Ren H., Bahrami A., Cehlin M., Wallhagen M. Proposing new adhesive-free timber edge connections for cross-laminated timber panels: A step toward sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e02975. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e02975
16. Byloos D., Vandoren B. Experimental and analytical assessment of the racking behavior of timber frame walls with single-sided double-layered sheathing panels. *Engineering Structures*. 2024; 316:118592. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118592
17. Casagrande D., Setti A., Polastri A. Structural behaviour of light-frame timber shear-walls with diagonal board sheathing. *Construction and Building Materials*. 2024; 416:135077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135077
18. Manser N., Steiger R., Geiser M., Otti M., Frangi A. Shear resistance of Oriented Strand Board panel sheathings in timberframed shear walls. *Engineering Structures*. 2024; 316:118461. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118461
19. Dobrila P., Premrov M. Reinforcing methods for composite timber frame–fiberboard wall panels. *Engineering Structures*. 2003; 25(11):1369-1376. DOI: 10.1016/S0141-0296(03)00109-3
20. Muñoz W., Salenikovich A. Determination of Yield Point and Ductility of Timber Assemblies: In Search of Harmonised Approach. *10th World Conference on Timber Engineering*. 2008; 1064-1071.
21. Kavelin A.S. The current position of the problem of calculating nagelnyh compounds in wooden wall panels. *Engineering journal of Don*. 2018; 2(49):154. EDN YATFYL. (rus.).
22. Labudin B.V., Popov E.V., Tyurikova T.V., Nikitina T.A., Ruslanova A.V. Experimental Studies of the Strength and Rigidity of Screw Connections of Covers with Wooden Ribs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(4):42063. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042063

23. Hassanieh A., Valipour H. Experimental and numerical study of OSB sheathed-LVL stud wall with stapled connections. *Construction and Building Materials*. 2020; 233:117373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117373

24. Véliz F., Estrella X., Lagos J., Guindos P. Testing and nonlinear modelling of industrialized light-frame wooden diaphragms including optimized nailing and nonstructural sheathing. *Engineering Structures*. 2023; 297:117017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117017

25. Labudin B.V., Popov E.V., Sopilov V.V. Stability of compressed sheathings of wood composite plate-ribbed structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 687(3):033041. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033041

26. Chernykh A.G., Danilov E.V., Koval P.S. Stiffness analysis of connections of LVL structures with claw washers. *Russian Forestry Journal*. 2020; 4(376): 157-167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167. EDN FEWWLQ. (rus.).

27. Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdravovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact

Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear. *Russian Forestry Journal*. 2020; 4(376):178-189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189. EDN UVVWNN.

28. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Popov E.V., Roshchina S.I. Dowel and washer connections for elements of wooden structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 9:35-50. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.35-50. EDN WMLATP. (rus.).

29. Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V. Calculation of shear stability of conjugation of the main pillars with the foundation in wooden frame buildings. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 867-876. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_85

30. Jacquier N., Girhammar U.A. Evaluation of bending tests on composite glulam-CLT beams connected with double-sided punched metal plates and inclined screws. *Construction and Building Materials*. 2015; 95:762-773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.137

Received October 29, 2025.

Adopted in revised form on November 7, 2025.

Approved for publication on December 3, 2025.

**B I O N O T E S :** **Egor V. Popov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; SPIN-code: 5395-2753, ID RSCI: 896523, Scopus: 57208305419, ResearcherID: AAY-2235-2020, ORCID: 0000-0002-8950-7558; EPV1989@yandex.ru;

**Denis A. Stolypin** — postgraduate student of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; SPIN-code: 2845-6362, ID RSCI: 1079070, Scopus: 57208307525, ResearcherID: AES-3773-2022, ORCID: 0000-0003-0153-8729; stolypin.denis.a@yandex.ru;

**Oleg V. Koprov** — postgraduate student of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; SPIN-code: 1531-5494, ID RSCI: 1312676; vorpok28@gmail.com;

**Boris V. Labudin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; SPIN-code: 6705-1677, ID RSCI: 510962, ResearcherID: AAY-2237-2020, ORCID: 0000-0002-2547-3096; sevned@mail.ru;

**Sergey V. Usanov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., build. 1, Krasnodar, 350042, Russian Federation; senior researcher at the Laboratory for Monitoring of Housing and Communal Services and Radiation Safety in Construction; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 1144-6400, ID RSCI: 1157225, Scopus: 58287097200, ResearcherID: JQW-2943-2023, ORCID:0000-0002-7395-1641; svusanov@gmail.com.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Структурные особенности асфальтобетонов при использовании капсул для самовосстановления

Сергей Сергеевич Иноземцев<sup>1</sup>, Евгений Валерьевич Королев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В соответствии с широкой номенклатурой асфальтобетонных смесей, предусмотренной обновленной нормативной базой, содержание органической и минеральной части может быть различным и их влияние на капсулы, добавленные в стандартную органоминеральную систему, также может быть неодинаковым. Исследование направлено на установление граничных условий применения модификатора в виде капсул с восстанавливающим агентом в составе асфальтобетонных смесей с различным гранулометрическим составом и количеством битумного вяжущего.

**Материалы и методы.** Изучались зерновые составы минерального остова в соответствии с требованиями для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей по ГОСТ 31015–2002, ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58401.2–2019, а также горячих асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128–2013, ГОСТ Р 58406.2–2020 и ГОСТ Р 58401.1–2019.

**Результаты.** Предложен подход, который может быть использован для оценки пригодности асфальтобетонных смесей на этапе проектирования состава минеральной части с учетом геометрических размеров применяемого капсулированного модификатора. Количество капсул зависит от остаточной пористости проектируемых асфальтобетонов, что следует учитывать при подборе состава и уплотнении асфальтобетонной смеси.

**Выводы.** Необходимой структурой минерального каркаса для применения модификатора для самовосстановления в виде капсул с диаметром 1,1 мм обладают смеси на основе минерального остова с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2, SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. При некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул в смесях типа А, Б, В, А11Вт и SP-11.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** самовосстановление, асфальтобетон, структура, модификатор, капсула, зерновой состав, пористость

*Благодарности.* Данная работа выполнена в рамках Программы развития НИУ МГСУ на 2025–2036 годы при реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», а также финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Иноземцев С.С., Королев Е.В. Структурные особенности асфальтобетонов при использовании капсул для самовосстановления // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 233–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.233-245

Автор, ответственный за переписку: Сергей Сергеевич Иноземцев, inozemtsevss@mail.ru.

## Structural features of asphalt concrete when using capsules for self-healing

Sergey S. Inozemtcev<sup>1</sup>, Evgeny V. Korolev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Given the wide range of asphalt concrete mixtures covered by the updated regulatory framework, the organic and mineral content may vary, and their impact on capsules added to a standard organomineral system may also be variable. This study aims to establish the boundary conditions for the use of a modifier in the form of capsules containing a restoring agent in asphalt concrete mixtures with varying particle size distributions and bitumen binder contents.

**Materials and methods.** The particle size distribution of the mineral framework were studied in accordance with the requirements for stone-mastic asphalt concrete mixtures according to GOST 31015–2002, GOST R 58406.1–2020 and GOST R 58401.2–2019, as well as hot asphalt concrete mixtures according to GOST 9128–2013, GOST R 58406.2–2020 and GOST R 58401.1–2019.

**Results.** An approach is proposed that can be used to assess the suitability of asphalt concrete mixtures at the design stage of the mineral component, taking into account the geometric dimensions of the encapsulated modifier used. The number of capsules depends on the residual porosity of the designed asphalt concrete, which must be taken into account when selecting the composition and compacting the asphalt concrete mixture.

**Conclusions.** The required mineral framework structure for using the self-healing modifier in the form of capsules with a diameter of 1.1 mm is required for mixtures based on a mineral framework with a maximum size of at least 10 mm. Such mixtures include stone mastic asphalt concretes SHMA-20 and SHMA-15, which meet the requirements of GOST 31015; SHMA-22, SHMA-16, and SHMA-11, which meet the requirements of GOST R 58406.1; SMA-22 and SMA-16, which meet the requirements of GOST R 58401.2; as well as hot-mix asphalt concretes A22Vt and A16Vt, which meet the requirements of GOST R 58406.2; SP-32, SP-22, and SP-16, which meet the requirements of GOST R 58401.1. With some grain compositions, near the maximum permissible limit, voids may form in the frameworks with sufficient volume to accommodate capsules in mixtures of type A, type B, type B, A11Bt and SP-11.

**KEYWORDS:** self-healing, asphalt concrete, structure, modifier, capsule, grain size distribution, porosity

**Acknowledgements.** The research was conducted as part of development program for 2025–2036 of Moscow State University of Civil Engineering under the framework of strategic academic leadership program “Priority 2030” and was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2026-0003.

**FOR CITATION:** Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Structural features of asphalt concrete when using capsules for self-healing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):233-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.233-245 (rus.).

*Corresponding author:* Sergey S. Inozemtcev, inozemtsevss@mail.ru.

*Только в конце работы становится ясно,  
с чего надо было начать.*

Блез Паскаль

## ВВЕДЕНИЕ

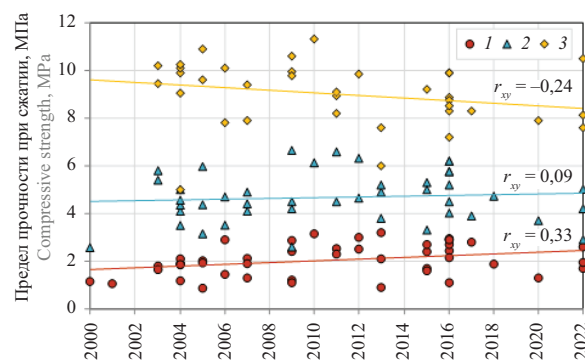
Формирование структуры асфальтобетона, способной сопротивляться воздействиям транспорта и погоднo-климатических факторов, — основное условие длительного срока эксплуатации дорожного покрытия автомобильной дороги. Эксплуатационная стойкость структуры асфальтобетона обуславливается качеством и количеством материалов, применяемых для его производства [1–10]. Развитие технологии асфальтобетонов приводит к усложнению компонентного состава смесей за счет использования новых функциональных модификаторов, регулирующих технологические свойства и позволяющих получать материал с уникальным сочетанием характеристик.

Использование модификаторов дает возможность увеличивать стойкость асфальтобетонов к воздействию повышенных температур, что положительно влияет на способность сопротивляться динамическим нагрузкам и образованию колес в летний период эксплуатации [5–7]. Сокращение чувствительности к пониженным температурам позволяет снизить хрупкость асфальтобетонов, что обеспечивает способность сопротивляться трещинообразованию в зимний период эксплуатации [8–10]. Однако для материала на органическом вяжущем улучшение высокотемпературных и низкотемпературных свойств является задачей поиска компромиссных решений (рис. 1).

Таким образом, для обеспечения большей стойкости к эксплуатационным факторам требуется достижение баланса между упруго-пластичными и хрупкими

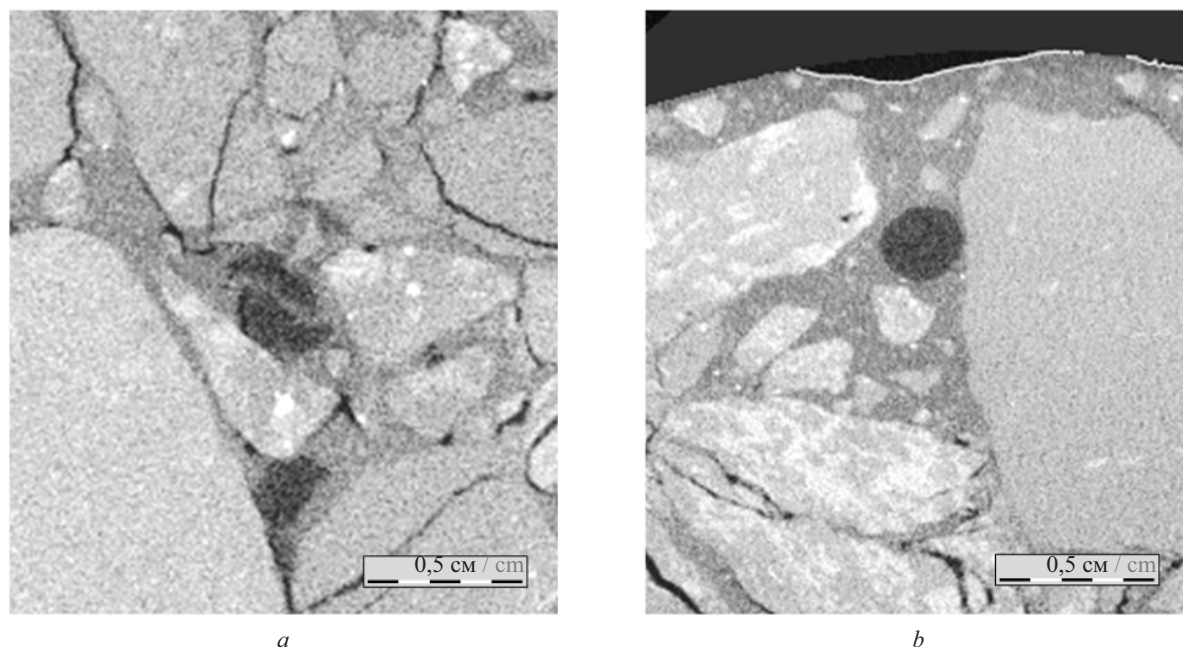
свойствами материала. С этим связан поиск исследователями таких решений, которые позволяют получить материал с необходимым качеством с учетом требований потребителя (комфортность при эксплуатации, срок службы) и нормативных требований (показатели свойств). Одним из таких решений служит применение модификаторов, обеспечивающих способность асфальтобетонов к самовосстановлению в период эксплуатации.

Реализация самовосстановления в асфальтобетонах достигается за счет ресурсного потенциала, формируемого находящимся в составе материала специальным модификатором в виде капсул с восстанавливающим агентом [11–15]. Капсулы в асфальтобетоне являются элементом структуры, который закономерно оказывает влияние на структурообразование (физические и химические свойства поверхности) и параметры структуры материала (изменение



**Рис. 1.** Изменение значений предела прочности при сжатии при температуре 50 °C (1); 20 °C (2); 0 °C (3) в исследованиях с 2000 по 2022 г.

**Fig. 1.** Change in the values of compressive strength at a temperature of 50 °C (1); 20 °C (2); 0 °C (3) in studies from 2000 to 2022



**Рис. 2.** Томографические изображения структуры асфальтобетона с преждевременным разрушением капсул (а) и сохранностью капсул (b)

**Fig. 2.** Tomographic images of the structure of asphalt concrete with premature destruction of capsules (a) and preservation of capsules (b)

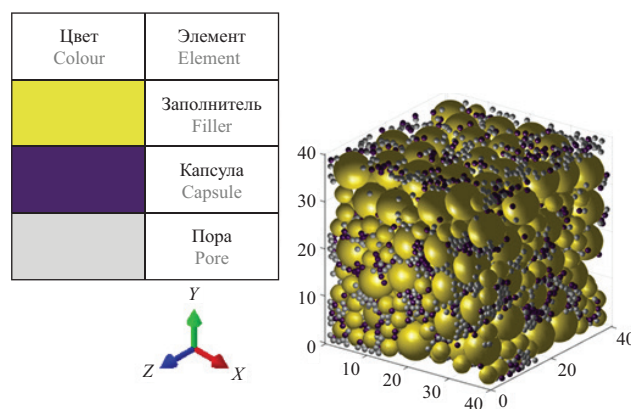
геометрических характеристик структуры: содержания компонентов, толщины слоя битума и т.д.). Назначение оболочки капсул заключается в сохранении восстанавливающего агента от участия в процессах структурообразования до момента образования дефектов в асфальтобетоне. Поэтому чрезмерное воздействие других структурных элементов может приводить к негативному влиянию на капсулы, например их преждевременному разрушению. Это возможно на этапе производства асфальтобетонной смеси и ее уплотнения при укладке в дорожное покрытие (рис. 2).

В соответствии с широкой номенклатурой асфальтобетонных смесей, предусмотренной обновленной нормативной базой, содержание органической и минеральной части может быть различным и их влия-

ние на капсулы, добавленные в стандартную органоминеральную систему, также может быть неодинаковым [12–19]. Ранее доказано [20], что в ЦМА-15 сохранность<sup>1</sup> капсул после уплотнения асфальтобетонной смеси достигает 97 % кальций-алгинатных капсул (рис. 3).

Для других типов смесей сохранность капсул может быть меньше в зависимости от структуры, формируемой в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси. Сохранность капсул в структуре асфальтобетона зависит от функции каждого компонента смеси. Так, в минеральном остове зерна щебня и крупного песка

<sup>1</sup> Сохранность — доля капсул, сохранивших целостность после всех технологических воздействий по приготовлению и уплотнению асфальтобетонной смеси.



**Рис. 3.** Модель распределения элементов структуры в асфальтобетоне [20]

**Fig. 3.** Model of distribution of structural elements in asphalt concrete [20]

участвуют в формировании жесткого пространственного каркаса, которые при контакте друг с другом в процессе уплотнения образуют зоны наибольшего механического напряжения [21, 22]. При попадании в такие зоны капсулы испытывают большие нагрузки и могут быть разрушены.

Мелкие фракции песка и минерального наполнителя совместно с битумом образуют асфальтовое вяжущее вещество, которое заполняет пространство между зернами жесткого пространственного каркаса. Через асфальтовое вяжущее на капсулы воздействует значительно меньшее давление в результате его распределения. Это способствует большей сохранности капсул в такой среде при уплотнении.

Цель исследования — установление граничных условий применения модификатора в виде капсул с восстанавливающим агентом в составе асфальтобетонных смесей с различным гранулометрическим составом и количеством битумного вяжущего.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались зерновые составы минерального остова в соответствии с требованиями для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей по ГОСТ 31015–2002, ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58401.2–2019, а также горячих асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128–2013, ГОСТ Р 58406.2–2020 и ГОСТ Р 58401.1–2019. Рассматривались особенности структуры получаемых смесей и асфальтобетонов с учетом общего содержания пустот в заполнителе (ПМЗ), заполненных битумом (ПНБ), общей объемной плотности минерального заполнителя, остаточной пористости.

Относительный объем пустот, заполненных битумом, определяется в соответствии с формулой:

$$\text{ПНБ} = \frac{\text{ПМЗ} - P_a}{\text{ПМЗ}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $P_a$  — общее количество пор в асфальтобетоне (остаточная пористость), %.

Пустоты в минеральном заполнителе рассчитываются следующим образом:

$$\text{ПМЗ} = \frac{1 - G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $G_{mb}$  — объемная плотность асфальтобетона (принята для расчета 2,4 г/см<sup>3</sup>);  $P_s = 1$  — объемное количество минерального заполнителя в асфальтобетонной смеси;  $G_{sb}$  — общая объемная плотность минерального заполнителя, входящего в состав асфальтобетонной смеси, г/см<sup>3</sup>. Общая объемная плотность минерального заполнителя определяется с использованием формулы:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1/G_1 + P_2/G_2 + \dots + P_n/G_n}, \quad (3)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  — количество в асфальтобетонной смеси каждого отдельного минерального заполнителя, %;  $G_1, G_2, \dots, G_n$  — объемные плотности каждо-

го отдельного минерального заполнителя, входящего в состав асфальтобетонной смеси, г/см<sup>3</sup>.

В качестве капсулированного модификатора для самовосстановления асфальтобетонов рассматривались кальций-альгинатные капсулы с диаметром 1,1 мм, максимальной разрушающей силой не менее 16 Н и содержащие восстанавливающий агент не менее 90 % от общего объема [20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обеспечение сохранности капсул в структуре асфальтобетона после уплотнения смеси достигается выполнением двух основных условий:

- формированием минерального каркаса с минимальной концентрацией зон высокого механического напряжения;
- достаточным количеством асфальтового вяжущего вещества.

Условием формирования минерального каркаса, в котором капсулы не разрушатся, является создание структуры, где капсулы не нарушают естественную упаковку зерен и не выступают в качестве элемента скелета.

Рассматривая кубическую и гранецентрированную упаковку монодисперсных зерен сферической формы диаметром  $D$ , размер пустоты между частицами, где может разместиться дополнительный элемент без раздвижки зерен, составляет  $0,414 \cdot D$  и  $0,155 \cdot D$  соответственно (рис. 4).

В таком случае значением, характеризующим границу размерности включений, влияющих на упаковку зерен минерального каркаса, является  $0,285 \cdot D$ . Таким образом, если капсула диаметром  $d_c < 0,285 \cdot D$  добавляется в смесь, то она свободно размещается в межзерновом пространстве и находится в объеме, окруженная битумом и мелкими частицами минеральной части, с распределенным давлением от уплотнения смеси. В случае, если диаметр капсулы  $d_c \geq 0,285 \cdot D$ , то капсула становится элементом минерального каркаса, встраиваясь в цепочку контактов зерен, через которые воспринимаются сжимающие и сдвиговые нагрузки с дальнейшей концентрацией напряжений. В результате капсула может быть разрушена.

Следует учитывать, что минеральный состав асфальтобетонной смеси состоит из полидисперсной смеси, состоящей из зерен угловатой формы, которые укладываются в нерегулярный порядок. При этом для различных типов асфальтобетонных смесей минимальный размер зерен минерального каркаса будет отличаться. Размер пустот в минеральном каркасе зависит от расстояния между частицами, которое рассчитывается на основе формулы [23–25]:

$$h \approx \frac{\langle d^3 \rangle - \langle d^2 \rangle^{3/2}}{\langle d^2 \rangle}, \quad (4)$$

где  $\langle d^2 \rangle$  и  $\langle d^3 \rangle$  — средневзвешенное значение диаметра частиц в полифракционной смеси с показателем

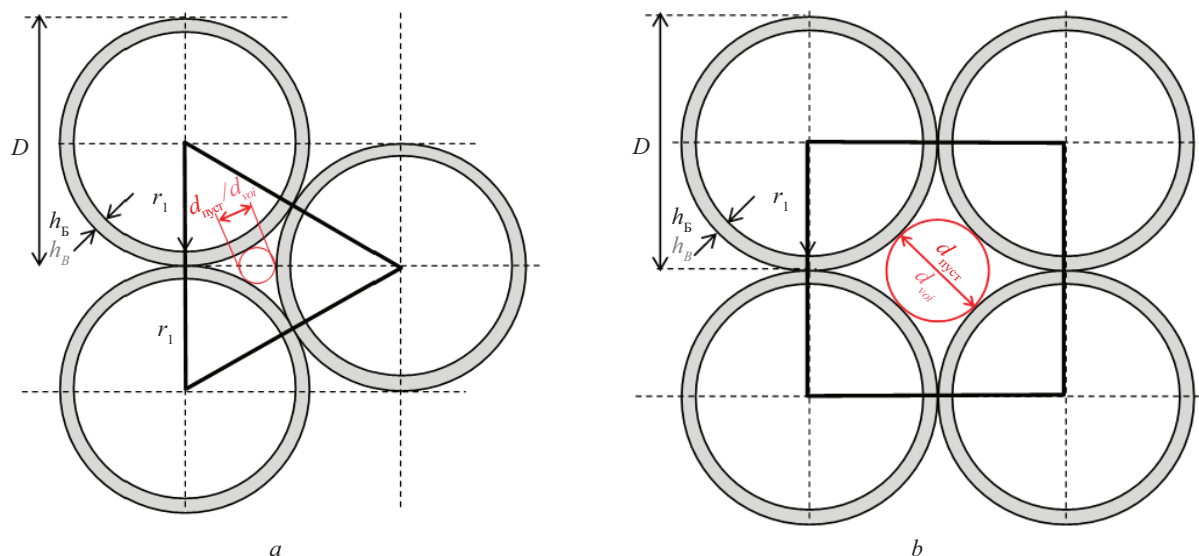


Рис. 4. Модель расчета размеров для размещения капсул в зерновом остове для гранецентрированной кубической (а) и кубической упаковки зерен (b)

Fig. 4. MModel for calculating the dimensions for placing capsules in a grain core for face-centered cubic (a) and cubic grain packing (b)

степени два и три соответственно;  $\langle d^n \rangle = \sum_i f_i \cdot d_i^n$ ;  $f_i$  — объемная доля зерен с диаметром  $d_i$ .

Числитель формулы пропорционален свободному объему в упаковке частиц, а знаменатель — суммарной поверхности частиц. В идеальной системе средний радиус пустот или полости, где может разместиться капсула,  $0,5 \cdot h$ , тогда для асфальтобетонной смеси этот размер будет значительно меньше. Отсюда радиус пустот или допустимый размер капсул в асфальтобетонной смеси будет равен:

$$r_{\text{пуст}} = k \frac{\langle d^3 \rangle - \langle d^2 \rangle^{3/2}}{\langle d^2 \rangle}, \quad (5)$$

для которого  $k$  зависит от нескольких параметров:

$$k = k_{\text{poly}} \cdot k_{\text{form}} \cdot k_{\text{bit}} \cdot k_{\text{pack}}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{poly}}, k_{\text{form}}, k_{\text{bit}}, k_{\text{pack}} < 1,0$  — коэффициенты, учитывающие полидисперсность зернового состава, несферичность формы зерен, наличие битума в системе, неоднородность упаковки соответственно.

Коэффициент полидисперсности может быть рассчитан с использованием среднечисленного диаметра  $d_n$  и среднемассового (или среднеобъемного) диаметра  $d_w$  [26, 27]:

$$k_{\text{poly}} = \bar{d}_n / \bar{d}_w, \quad (7)$$

для которого:

$$\bar{d}_n = \sum_i f_n d_i, \quad (8)$$

где  $f_n = n_i / \sum n_i$  — доля  $i$ -й фракции (диаметром  $d_i$ );  $n_i$  — количество частиц  $i$ -й фракции;

$$\bar{d}_w = \sum_i f_{wi} d_i, \quad (9)$$

где  $f_{wi} = n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^3$  — массовая (объемная) доля  $i$ -й фракции (диаметром  $d_i$ ).

Согласно исследованиям [28, 29], коэффициент формы для сферических частиц  $k_{\text{form}} = 1$ , а для округлой и угловой формы частиц, которая характерна для зерен заполнителя асфальтобетонов,  $k_{\text{form}} = 0,77$  и  $k_{\text{form}} = 0,66$ , соответственно. Наличие низкокачественных зерен продолговатой и пластинчатой формы снижает  $k_{\text{form}}$  до значений 0,58 и 0,43 соответственно.

Очевидно, что введение битума в минеральную часть способствует уменьшению объема пустот  $V_0$  до некоторого значения  $V_1$ , который с учетом допущения об их сферичной форме [29] связан с их радиусом зависимостью  $r^3 \propto V$  или  $r \propto V^{1/3}$ . Тогда изменение размера пустот будет определяться с учетом пустот, заполненных битумом ПНБ [30]:

$$k_{\text{bit}} = \frac{r_1}{r_0} = \sqrt[3]{\frac{V_1}{V_0}} = \sqrt[3]{1 - \text{ПНБ}}. \quad (10)$$

Пустотность минеральной части в асфальтобетонной смеси в среднем равна 12–18 %, что позволяет применять коэффициент упаковки зерен  $k_{\text{pack}}$  от 0,82 до 0,88.

Таким образом, для типов асфальтобетонных смесей могут быть определены структурные параметры, позволяющие судить о возможности использования капсул, такие как среднее число контактов на одно зерно и средний размер пустот между зернами. Некоторые показатели свойств стандартных асфальтобетонных смесей представлены в табл. 1.

С использованием формулы (5) произведена оценка исследуемых асфальтобетонных смесей по показателю  $d_{\text{пуст}} = 2 \cdot r_{\text{пуст}}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ структурных особенностей различных видов асфальтобетонных смесей, зерновой состав

Табл. 1. Физические показатели свойства стандартных асфальтобетонных смесей

Table 1. Physical properties of standard asphalt concrete mixtures

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Количество зерен остова, % по объему Content of carcass grains, % by volume	Количество контактов на зерно Number of contacts per grain	Остаточная пористость, % Pore volume, %	Пустоты, заполненные битумом*, % Voids filled with bitumen*, %
ЩМА-20 / SMA-20	31015	75–83	3,0	1,5–4,5	73,0–85,0
ЩМА-15 / SMA-15		72–82	3,3	1,5–4,5	73,0
ЩМА-10 / SMA-10		71–79	4,0	1,5–4,5	73,0–89,3
ЩМА-22 / SMA-22	58406.1	65–80	2,9	2,0–6,0	63,3–63,5
ЩМА-16 / SMA-16		60–77	3,3	2,0–6,0	63,2–63,5
ЩМА-11 / SMA-11		60–75	3,8	2,0–5,5	65,4–65,8
ЩМА-8 / SMA-8		55–75	4,3	1,5–5,0	69,8–70,3
SMA-22	58401.2	72–82	3,3	3,7–4,3	63,5–63,8
SMA-16		73–81	3,8	3,7–4,3	63,7–63,8
SMA-11		65–80	4,6	3,7–4,3	63,3–63,8
SMA-8		71–81	2,8	3,7–4,3	63,7–63,8
Тип А / Type А	9128	62–72	4,7	2,5–5,0	65,2–65,3
Тип Б / Type В		52–62	5,3	2,5–5,0	64,9–65,0
Тип В / Type С		40–52	6,1	2,5–5,0	64,5
A22B <sub>т</sub> / A22U <sub>н</sub>	58406.2	42–63	4,6	2,5–5,0	61,5–61,6
A16B <sub>т</sub> / A16U <sub>н</sub>		42–63	5,3	2,5–4,5	64,0–64,2
A11B <sub>т</sub> / A11U <sub>н</sub>		42–63	5,8	2,5–4,5	64,0–64,2
SP-32	58401.1	10–60	4,5	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-22		10–55	5,4	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-16		10–52	6,5	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-11		10–42	8,0	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-8		10–34	11,1	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-4		0–10	20,4	3,7–4,3	57,6–58,5

Примечание: \* — рассчитано для плотности асфальтобетона  $G_{mb} = 2,4 \text{ г/см}^3$ .

Note: \* — calculated for asphalt concrete density  $G_{mb} = 2.4 \text{ g/cm}^3$ .

Табл. 2. Результаты расчета параметров структуры минерального каркаса асфальтобетонов

Table 2. Results of calculation of parameters of the structure of the mineral framework of asphalt concrete

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Значение параметров Parameters value					
		$k_{poly}$	$k_{form}$	$k_{bit}$	$k_{pack}$	$k$	$d_{пуст}$ , мм $d_{вор}$ , mm
ЩМА-20 / SMA-20	31015	0,62–0,75	0,66	0,65	0,84	0,22–0,27	1,24–1,53
ЩМА-15 / SMA-15		0,61–0,68	0,66	0,65	0,84	0,22–0,24	1,16–1,20
ЩМА-10 / SMA-10		0,68–0,78	0,66	0,65	0,84	0,24–0,28	0,52–0,66
ЩМА-22 / SMA-22	58406.1	0,58–0,66	0,66	0,72	0,84	0,23–0,26	2,07–2,08
ЩМА-16 / SMA-16		0,56–0,63	0,66	0,72	0,84	0,22–0,25	1,51–1,61
ЩМА-11 / SMA-11		0,58–0,63	0,66	0,70	0,84	0,23–0,25	1,43–1,54
ЩМА-8 / SMA-8		0,60–0,70	0,66	0,67	0,84	0,22–0,26	0,93–1,00
SMA-22	58401.2	0,52–0,68	0,66	0,71	0,84	0,21–0,27	1,87–2,01
SMA-16		0,59–0,69	0,66	0,71	0,84	0,23–0,27	1,21–1,37
SMA-11		0,62–0,67	0,66	0,71	0,84	0,25–0,27	0,86–1,01
SMA-8		0,57–0,77	0,66	0,71	0,84	0,23–0,30	0,78–0,96
Тип А / Type А	9128	0,51–0,61	0,66	0,70	0,84	0,20–0,24	0,81–1,88
Тип Б / Type В		0,43–0,52	0,66	0,71	0,84	0,17–0,20	0,87–1,89
Тип В / Type С		0,38–0,41	0,66	0,71	0,84	0,15–0,16	0,88–1,92

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Значение параметров Parameters value					
		$k_{poly}$	$k_{form}$	$k_{bit}$	$k_{pack}$	$k$	$d_{пуст}$ , мм $d_{воп}$ , мм
A22B <sub>T</sub> / A22U <sub>H</sub>	58406.2	0,37–0,46	0,66	0,73	0,84	0,15–0,19	2,00–2,64
A16B <sub>T</sub> / A16U <sub>H</sub>		0,36–0,48	0,66	0,71	0,84	0,16–0,19	1,39–1,89
A11B <sub>T</sub> / A11U <sub>H</sub>		0,45–0,51	0,66	0,71	0,84	0,18–0,20	1,24–0,98
SP-32	58401.1	0,37–0,46	0,66	0,75	0,84	0,17–0,28	2,47–3,11
SP-22		0,39–0,48	0,66	0,75	0,84	0,17–0,27	1,80–2,36
SP-16		0,45–0,51	0,66	0,75	0,84	0,17–0,26	1,30–1,74
SP-11		0,41–0,67	0,66	0,75	0,84	0,16–0,23	0,96–1,31
SP-8		0,40–0,64	0,66	0,75	0,84	0,15–0,20	0,60–0,96
SP-4		0,40–0,62	0,66	0,75	0,84	0,13–0,23	0,32–0,79

Примечание: диапазоны используются для составов зерновых материалов, равных допустимой нижней и верхней границе в соответствии со стандартом.

Note: ranges are used for grain compositions equal to the permissible lower and upper limits in accordance with the standard.

которых регламентируется государственным стандартами из разных систем проектирования, показывает, что эти смеси обладают необходимой структурой для размещения капсул для самовосстановления с диаметром 1,1 мм только при использовании заполнителя с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2; SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. Важно отметить смеси типа А, Б, В, А11Вт и SP-11, в которых при некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул.

Анализ нормативных требований к гранулометрическому составу асфальтобетонных смесей обеспечил установление границы концентраций различных фракций минеральных компонентов, с помощью которых формируется минеральный каркас с пустотами между зернами, в которых могут размещаться капсулы для самовосстановления асфальтобетона. Графически гранулометрические составы асфальтобетонных смесей показаны на рис. 5.

Анализ гранулометрических составов показывает, что для асфальтобетонных смесей в допустимых пределах в соответствии со стандартами может быть подобрана минеральная смесь как пригодная для использования капсул (с диаметром 1,1 мм), так и состав, где они будут разрушаться при уплотнении. Может быть предложена рецептурная граница зерновых составов для таких смесей, относительно которой осуществляется оценка их пригодности для реализации технологии самовосстановления.

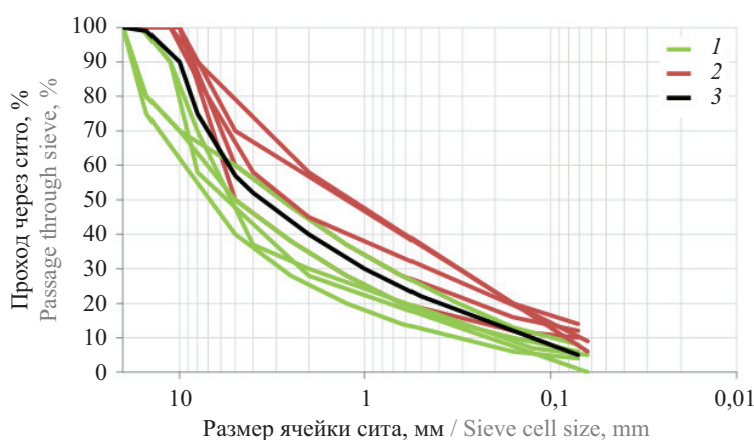


Рис. 5. Гранулометрические составы асфальтобетонных смесей с размером пустот: 1 —  $d_{пуст} > 1,1$  мм; 2 —  $d_{пуст} < 1,1$  мм; 3 — условная граница

Fig. 5. Particle size distribution of asphalt concrete mixtures with void sizes: 1 —  $d_{voi} > 1.1$  mm; 2 —  $d_{voi} < 1.1$  mm; 3 — conditional boundary

Табл. 3. Гранулометрический состав контрольной асфальтобетонной смеси

Table 3. Particle size distribution of the control asphalt concrete mixture

Проход зерен размером мельче соответствующей ячейки сита (мм), % Grain composition finer than a sieve mesh (mm), %												
20	15(16)	10(11,2)	8	5	4	2,5	2,0	1,0	0,63	0,316	0,16	0,071
100	99	90	75	57	52	44	40	30	23	14	9	5

Гранулометрический состав контрольной смеси представлен в табл. 3.

Полученная граница может быть использована для подбора состава минеральной части асфальтобетонной смеси, содержащей капсулы с восстанавливающим агентом, диаметр которых равен 1,1 мм. Для капсул других размеров граница зернового состава должна быть уточнена.

Стоит отметить, что оптимальная структура асфальтобетона после уплотнения смеси характеризуется остаточной пористостью, которая регламентируется соответствующим стандартом. При этом добавление в состав асфальтобетонной смеси капсул с восстанавливающим агентом приводит к тому, что они могут занимать объем межзерновых пустот, уменьшая остаточную пористость (при постоянном расходе битума

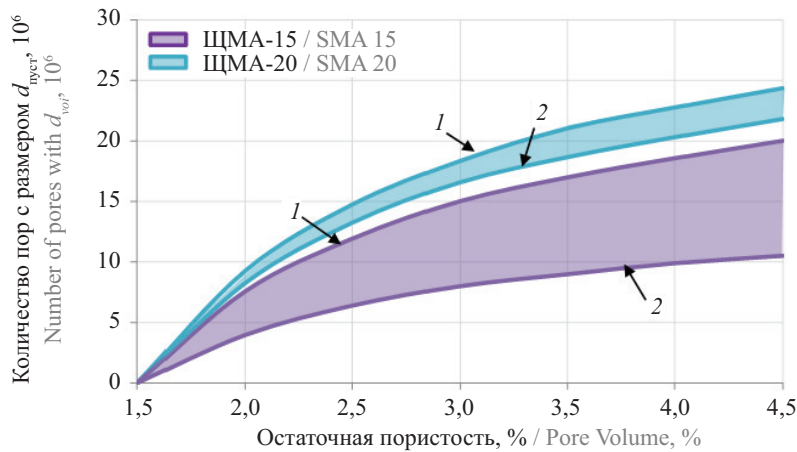


Рис. 6. Зависимость количества пор для 1 м³ ЩМА от остаточной пористости: 1 — для нижней границы зернового состава; 2 — для верхней границы зернового состава

Fig. 6. Dependence of the number of pores for 1 m³ of SMA on the residual porosity: 1 — for the lower boundary of the grain composition; 2 — for the upper boundary of the grain composition

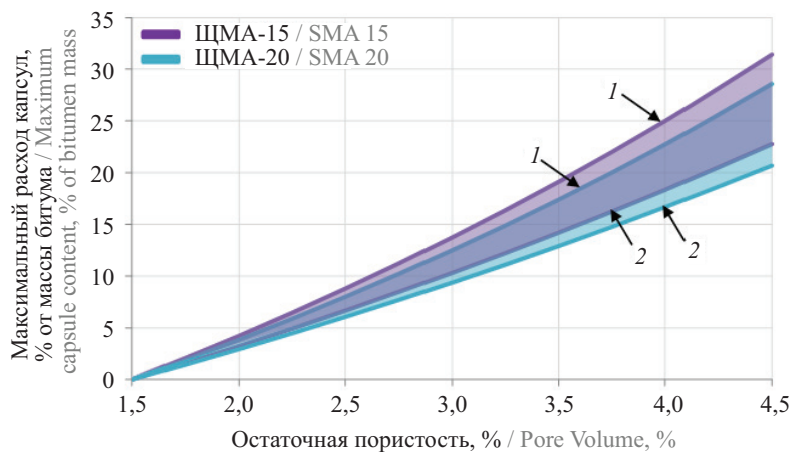


Рис. 7. Зависимость максимального расхода капсул на 1 м³ ЩМА от остаточной пористости: 1 — ПМЗ = 15 %; 2 — ПМЗ = 19 %

Fig. 7. Dependence of the maximum consumption of capsules per 1 m³ of SMA on the residual porosity: 1 — Voidness = 15 %; 2 — Voidness = 19 %

и минерального порошка). Это предполагает условие, что количество пор, объем которых может быть занят капсулами, ограничено минимально возможной остаточной пористостью, что показано на примере ЩМА (рис. 6).

При достижении остаточной пористости 1,5 % в структуре ЩМА-15 не остается пор с размером  $d_{\text{пуст}}$ , которые могут быть заняты капсулами, что будет приводить к их вытеснению и возможному разрушению зернами заполнителя при уплотнении асфальтобетонной смеси. На рис. 6 видно, что в нормируемых пределах увеличение остаточной пористости является условием увеличения количества пор, пригодных заполнить капсулами с диаметром 1,1 мм. Максимальный расход капсул (% от массы битума) может быть рассчитан по формуле:

$$C_{\text{кап, макс}} = \frac{\rho_{\text{кап}} (V \cdot P_a - 100 \cdot V_{n, \text{min}})}{\rho_6 \cdot V \cdot (\text{ПМЗ} - P_a)}, \quad (11)$$

где  $\rho_6$  и  $\rho_{\text{кап}}$  — плотность битума и капсул с восстанавливающим агентом соответственно, кг/м<sup>3</sup> (в расчете использовано  $\rho_6 = 1000$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_{\text{кап}} = 1100$  кг/м<sup>3</sup>);

$V_{n, \text{min}} = \frac{V \cdot \text{ПМЗ}}{100} \left( 1 - \frac{1 - P_{a, \text{min}}}{\text{ПМЗ}} \right)$  — минимальный объем

пор в асфальтобетоне, м<sup>3</sup>, на объем асфальтобетона  $V = 1$  м<sup>3</sup> в соответствии со стандартом (в расчете использовано  $P_{a, \text{min}} = 1,5$  %).

Это условие может быть применено при проектировании состава асфальтобетона, обладающего самовосстановлением [31], которое обеспечивается введением капсул, содержащих восстанавливающий агент (рис. 7). На рис. 7 видно, что увеличение остаточной пористости на каждый 1 % увеличивает потенциальный расход капсул с  $d_{\text{пуст}}$  на 7–10 %. Этот результат позволяет осуществлять оптимизацию количества капсул в смеси по показателям эффективности самовосстановления.

Таким образом, при подборе состава асфальтобетонных смесей, модифицированных капсулами с восстанавливающим агентом, можно использовать

разработанный подход, предполагающий установление размера пустот, в которых способны разместиться капсулы без нарушения структуры, а также расчет максимального расхода капсул.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимой структурой минерального каркаса для применения модификатора для самовосстановления в виде капсул с диаметром 1,1 мм обладают смеси на основе минерального остова с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2; SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. При некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул в смесях типа А, Б, В, А11Вт и SP-11.

Предложен подход, который возможно использовать для оценки пригодности асфальтобетонных смесей на этапе проектирования состава минеральной части с учетом геометрических размеров применяемого капсулированного модификатора. Количество капсул зависит от остаточной пористости проектируемых асфальтобетонов, что следует учитывать при подборе состава и уплотнении асфальтобетонной смеси.

Повышение остаточной пористости является условием увеличения количества пор, пригодных заполнить капсулами с диаметром 1,1 мм, для которых может быть рассчитан максимальный расход капсул (% от массы битума) с помощью формулы:

$$C_{\text{кап, макс}} = \frac{\rho_{\text{кап}} (V \cdot P_a - 100 \cdot V_{n, \text{min}})}{\rho_6 \cdot V \cdot (\text{ПМЗ} - P_a)}.$$

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шилов О.А. Обоснование требований к эксплуатационным свойствам асфальтобетонов верхних слоев оснований по показателю усталостной прочности // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 74–83. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.007. EDN YFSAPT.

2. Миронов Н.С., Чернов С.А. Определение эффективности влияния различных адгезионных добавок на эксплуатационные показатели свойств асфальтобетона // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4 (100). С. 532–553. EDN HUKJTC.

3. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Мавлиев Л.Ф., Буланов Н.Е. Современные методы оценки эксплуатационных свойств дорожных асфальтобетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (39). С. 279–285. EDN YIOBBV.

4. Котлярский Э.В., Кочнев В.И., Давлятова Д.Ю. Блок учета характеристик исходных материалов при автоматизированном проектировании асфальтобетонных смесей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 33–38. EDN RPJPIR.

5. Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Прибылов В.С., Мурко В.В. Асфальтовые бетоны с использованием отходов обогатительных предприятий угольной промышленности Кузбасса // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 2 (65). С. 44–49. EDN VJJWHN.
6. Ядыкина В.В., Кузнецова Е.В., Лебедев М.С. Изменение свойств асфальтобетона при использовании гидрофобизированного минерального порошка // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23. EDN AQJHRL.
7. Гладких В.А., Королёв Е.В., Альбакасов А.И. Исследование вязкости серобитумных вяжущих // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 72–76. EDN ZTTDQH.
8. Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Буянтуев С.Л., Доржиева Е.В. Использование углеродных наноматериалов для получения эффективного дорожно-строительного композита // Вестник ВСГУТУ. 2014. № 6 (51). С. 67–72. EDN TFLAVX.
9. Лесовик В.С., Денисов В.П., Кабалин М.Д., Высоцкая М.А. Обоснование выбора асфальтогранулобетонных смесей типов М и К с позиции совместной работы слоев основания и покрытия дорожной одежды // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 51–62. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6. EDN HJQTES.
10. Небратенко Д.Ю., Жемерикин А.Н., Лямкин Д.И. Исследование свойств крупнотоннажных продуктов лесохимии как пластификаторов дорожных битумов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 1. С. 73–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.73-83. EDN XQLZMT.
11. Руденский А.В. О контроле качества асфальтобетона при строительстве дорожных покрытий // Мир дорог. 2020. № 133. С. 75–77. EDN BJAEEU.
12. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 1. P. 168. DOI: 10.3390/ma12010168
13. Al-Mansoori T., Micaelo R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1091–1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137
14. Prasetial M.S., Djakfar L., Wisnumurti W., Sabarudin A. The Effect of Calcium Alginate Capsule on Resilience Modulus of Buton Rock Asphalt-Based Self-Healing Mixtures // Civil Engineering and Architecture. 2023. Vol. 11. Issue 6. Pp. 3249–3259. DOI: 10.13189/cea.2023.110601
15. Yu X., Liu Q., Wan P., Song J., Wang H., Zhao F. et al. Effect of Ageing on Self-Healing Properties of Asphalt Concrete Containing Calcium Alginate/Attapulgite Composite Capsules // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 4. P. 1414. DOI: 10.3390/ma15041414
16. Носов С.В. Альтернатива системе Superpave при формировании региональных дорожных НИИ // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4 (60). С. 87–96. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.009 EDN SHLPGN.
17. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. Принципы формирования оптимальной структуры асфальтобетона // Фундаментальные исследования. 2012. № 11–1. С. 124–128. EDN PKWJSP.
18. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 8–14. DOI: 10.34031/article\_5ca1f62f6b9a09.67742444. EDN VVZUTB.
19. Иноземцев С.С., Сусанина Т.В., Стибунов Д.В., Кейта М.Л.Ф. Тенденции развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов в России // Строительные материалы. 2023. № 12. С. 4–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19. EDN DYTPSR.
20. Inozemtcev S., Jelagin D., Korolev E., Fadil H., Partl M.N., Trong D.T. Experimental and numerical study on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent // Materials and Structures. 2022. Vol. 55. Issue 9. DOI: 10.1617/s11527-022-02059-8
21. Белицкий В.Д., Катунин А.В. Тезаурус математических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 18–21. EDN RSSITT.
22. Симчук Е.Н., Жданов К.А., Дедковский И.А. Совершенствование подходов и методов оценки физических и эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона в России // Дороги и мосты. 2021. № 1 (45). С. 181–221. EDN NLXXIP.
23. Rumpf H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft // Chemie Ingenieur Technik. 1965. Vol. 37. Issue 3. Pp. 187–202. DOI: 10.1002/cite.330370303
24. Rumpf H., Gupte A.R. Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenstromung // Chemie Ingenieur Technik. 1971. Vol. 43. Issue 6. Pp. 367–375. DOI: 10.1002/cite.330430610
25. Rumpf H. Particle Technology. Springer Netherlands, 1990. DOI: 10.1007/978-94-011-7944-7
26. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учебное пособие. М. : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2012. 56 с. EDN YKYHDV.
27. Придатко Ю.М., Королев Л.В., Готовцев В.М. Моделирование плотной упаковки частиц композитного материала // Вестник Саратовского

государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 4 (62). С. 96–100. EDN QINUXJ.

28. Патент RU № 2245740 С1. Способ обогащения горной массы месторождений тяжелых металлов / Держачев Б.П.; заявл. № 2003136938/03 от 24.12.2003; опубл. 10.02.2005.

29. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации : учебное пособие. 2-е изд. М. : МАКС Пресс, 2017. 88 с. EDN ZEFANH.

30. Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Smirnov V.A. Nanomodified bitumen composites: solvation shells and rheology // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2016. Pp. 405–410. DOI: 10.1201/b19693-85

31. Jwaida Z., Dulaimi A., Mydin M.A.O., Kadhim Y.N., Al-Busaltan S. The self-healing performance of asphalt binder and mixtures : a state-of-the-art review // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024. Vol. 9. Issue 7. DOI: 10.1007/s41062-024-01547-w

Поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ :** Сергей Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; inozemtsevss@mail.ru;

Евгений Валерьевич Королев — доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; korolev@nocnt.ru.

*Вклад авторов:*

Иноземцев С.С. — концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Королев Е.В. — научное консультирование, экспертная оценка концепции и методологии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shilo O.A. Substantiation of the requirements for performance properties of asphalt concrete of upper layers of bases in terms of fatigue strength. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 1(57):74-83. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.007. EDN YFSAPT. (rus.).

2. Mironov N.S., Chernov S.A. Determination of the effectiveness of the influence of various adhesive additives on the performance characteristics of asphalt concrete properties. *Engineering journal of Don*. 2023; 4(100):532-553. EDN HUKJTC. (rus.).

3. Khafizov E.R., Vdovin E.A., Fomin A.Y., Mavliev L.F., Bulanov P.E. Modern methods of assessment of operating ability of road asphalt concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 1(39):279-285. EDN YIOBBV. (rus.).

4. Kotlyarskij E.V., Kochnev V.I., Davlyatova D.Yu. Block for accounting of characteristics of initial materials in automated design of asphalt concrete mixtures. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013; 6:33-38. EDN RPJPIP. (rus.).

5. Pimenov A.T., Barakhtenova L.A., Pribylov V.S., Murko V.V. Asphaltic concrete at the waste of Kuzbass coal enrichment. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction Institute (State Technical University)*. 2021; 2(65):44-49. EDN VJJWHN. (rus.).

6. Yadykina V., Kuznetsova E., Lebedev M. Change in the properties of asphalt concrete when using hydrophobized mineral powder. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020; 4:17-23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23. EDN AQJHRL. (rus.).

7. Gladkikh V.A., Korolev E.V., Albakasov A.I. Research in viscosity of sulfur-asphalt binders. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 11:72-76. EDN ZTTDQH. (rus.).

8. Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Buyantuev S.L., Dorzhieva E.V. The use of carbon nanomaterials for effective road construction composite. *ESSUTM Bulletin*. 2014; 6(51):67-72. EDN TFLAVX. (rus.).

9. Lesovik V.St., Denisov V.P., Kabalin M.D., Vysotskaya M.A. Justification for the choice of asphalt granuloconcrete mixtures of types M and K from the perspective of the joint work of base layers and pavement surface. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):51-62. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6. EDN HJQTES. (rus.).

10. Nebratenko D.Yu., Zhemerikin A.N., Lyamkin D.I. Investigation of the properties of large-tonnage products of forest chemistry as plasticizers of road bitumen. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(1):73-83. DOI:

10.22227/1997-0935.2025.1.73-83. EDN XQLZMT. (rus.).

11. Rudensky A.V. On the quality control of asphalt concrete in the construction of road surfaces. *World of Roads*. 2020; 133:75-77. EDN BJAEEU. (rus.).

12. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete. *Materials*. 2019; 12(1):168. DOI: 10.3390/ma12010168

13. Al-Mansoori T., Micaelo R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017; 155:1091-1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137

14. Prasential M.S., Djakfar L., Wisnumurti W., Sabarudin A. The Effect of Calcium Alginate Capsule on Resilience Modulus of Buton Rock Asphalt-Based Self-Healing Mixtures. *Civil Engineering and Architecture*. 2023; 11(6):3249-3259. DOI: 10.13189/cea.2023.110601

15. Yu X., Liu Q., Wan P., Song J., Wang H., Zhao F. et al. Effect of Ageing on Self-Healing Properties of Asphalt Concrete Containing Calcium Alginate/Attapulgit Composite Capsules. *Materials*. 2022; 15(4):1414. DOI: 10.3390/ma15041414

16. Nosov S.V. Alternative to superpave system in the formation of regional road R&D institute. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 4(60):87-96. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.009 EDN SHLPGN. (rus.).

17. Gotovcev V.M., Shatunov A.G., Rummyantsev A.N., Sukhov V.D. Principles of forming the optimal structure of asphalt concrete. *Fundamental Research*. 2012; 11-1:124-128. EDN PKWJSP. (rus.).

18. Trautvain A., Akimov A., Denisov V., Lashin M. Features of the method of surrounded design of asphalt-concrete on superpave technology. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 3:8-14. DOI: 10.34031/article\_5ca1f62f6b9a09.67742444. EDN VVZUTB. (rus.).

19. Inozemtsev S.S., Susanina T.V., Stibunov D.V., Keita M.L.F. Trends in the development of scientific directions in the field of road construction materials in Russia. *Construction Materials*. 2023; 12:4-19. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19. EDN DYTSPSR. (rus.).

20. Inozemtcev S., Jelagin D., Korolev E., Fasil H., Partl M.N., Trong D.T. Experimental and numerical study

on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent. *Materials and Structures*. 2022; 55(9). DOI: 10.1617/s11527-022-02059-8

21. Belitskii V.D., Katunin A.V. Thesaurus of mathematical models of asphalt and concrete mix compaction process. *Omsk Scientific Bulletin*. 2013; 3(123):18-21. EDN RSSITT. (rus.).

22. Simchuk E.N., Zhdanov K.A., Dedkovskij I.A. Improving approaches and methods for assessing the physical and operational properties of road asphalt concrete in Russia. *Roads and Bridges*. 2021; 1(45):181-221. EDN NLXXIP. (rus.).

23. Rumpf H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft. *Chemie Ingenieur Technik*. 1965; 37(3):187-202. DOI: 10.1002/cite.330370303

24. Rumpf H., Gupte A.R. Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenstromung. *Chemie Ingenieur Technik*. 1971; 43(6):367-375. DOI: 10.1002/cite.330430610

25. Rumpf H. *Particle Technology*. Springer Netherlands, 1990. DOI: 10.1007/978-94-011-7944-7

26. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Yarovaya O.V. *Microscopic methods for determining the particle sizes of dispersed materials*. Moscow, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2012; 56. EDN YKYHDV. (rus.).

27. Pridatko Y.M., Korolev L.V., Gotovtsev V.M. Modeling of close packed particles arrangement in composite material. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2011; 4(4):(62):96-100. EDN QINUXJ. (rus.).

28. Patent RU No. 2245740 C1. *Method for enrichment of rock mass of heavy metal deposits* / Derkachev B.P.; appl. No. 2003136938/03 24.12.2003; publ. 10.02.2005. (rus.).

29. Leontiev N.E. *Fundamentals of fluid flows through porous media : textbook. 2nd ed.* Moscow, MAX Press, 2017; 88. EDN ZEFAHN. (rus.).

30. Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Smirnov V.A. Nanomodified bitumen composites: solvation shells and rheology. *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2016; 405-410. DOI: 10.1201/b19693-85

31. Jwaida Z., Dulaimi A., Mydin M.A.O., Kadhim Y.N., Al-Busaltan S. The self-healing performance of asphalt binder and mixtures : a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024; 9(7). DOI: 10.1007/s41062-024-01547-w

Received October 2, 2025.

Adopted in revised form on October 7, 2025.

Approved for publication on January 16, 2026.

**BIONOTES:** **Sergey S. Inozemtcev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; inozemtsevss@mail.ru;

**Evgeny V. Korolev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; korolev@nocnt.ru.

*Contribution of the authors:*

*Sergey S. Inozemtcev — research concept, methodology development, writing of the original text, final conclusions.*

*Evgeny V. Korolev — scientific consulting, expert evaluation of the concept and methodology.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Численное исследование воздухораспределения в помещениях квартир при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов

Николай Николаевич Монаркин<sup>1</sup>, Виктор Александрович Яковлев<sup>2</sup>,  
Татьяна Владимировна Монаркина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В гражданских зданиях существуют проблемы вентиляции, связанные с нарушением требуемого воздухообмена и высокими потерями теплоты. Одним из решений таких проблем является применение децентрализованных компактных реверсивных вентиляционных устройств с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. К подобным устройствам относятся стационарные переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы (СПРТ). Они дают высокую степень энергосбережения при небольших расходах воздуха. При применении СПРТ важен вопрос эффективности воздухообмена и воздухораспределения в помещении. Проведено исследование по оценке подвижности воздуха в помещениях типовых квартир при использовании данных устройств при различных характерных расходах воздуха.

**Материалы и методы.** Применен метод вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование) работы механической приточно-вытяжной вентиляции на основе компактного регенератора в двухкомнатной квартире. Для моделирования использован программный комплекс Ansys Fluent. Рассмотрена изотермическая постановка задачи. Модель турбулентности принята  $k-\omega$  ( $k-\omega$ ).

**Результаты.** Приведены поля распределения скорости движения воздуха в плане помещений на различной высоте при различных характерных расходах воздуха. Показаны увеличение подвижности воздуха в помещениях при увеличении производительности вентиляции; совместное действие механической децентрализованной вентиляции и естественной централизованной вытяжной вентиляции жилых зданий.

**Выводы.** По результатам моделирования определено, что при применении вентиляционных устройств типа СПРТ возможно обеспечение требуемой подвижности воздуха в помещениях, что способствует эффективному воздухообмену. Выявлено, что допустимая подвижность воздуха в помещениях устанавливается для расходов воздуха в диапазоне 50–100 м<sup>3</sup>/ч. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании механических систем вентиляции жилых многоквартирных зданий на основе компактных установок типа СПРТ, а также при сочетании естественной и механической вентиляции. В дальнейшем необходимо провести исследование воздухораспределения для других видов и типов квартир, что позволит расширить базу данных для выработки рекомендаций и создания методики проектирования систем вентиляции на основе компактных реверсивных устройств. Также требуется подтверждение моделирования экспериментом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СПРТ, теплоутилизатор, подвижность воздуха, воздухораспределение, воздухообмен, реверсивная вентиляция, скорость движения

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Монаркин Н.Н., Яковлев В.А., Монаркина Т.В. Численное исследование воздухораспределения в помещениях квартир при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 246–256. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.246-256

*Автор, ответственный за переписку:* Николай Николаевич Монаркин, [nikolay-monarkin@yandex.ru](mailto:nikolay-monarkin@yandex.ru).

## Numerical study of air distribution in apartment premises using compact regenerative heat exchangers

Nikolay N. Monarkin<sup>1</sup>, Viktor A. Iakovlev<sup>2</sup>, Tat'yana V. Monarkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vologda State University; Vologda, Russian Federation;

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);  
St. Petersburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Civil buildings have ventilation problems associated with inadequate air exchange and high heat loss. One solution to these problems is the use of decentralized compact reversible ventilation units with an exhaust air heat recovery function. They are called stationary switching regenerative heat exchangers (SSRHE). SSRHE provide a high degree of energy saving with low air flows. When using SSRHE, the issue of the effectiveness of air exchange and air distribution in the room is important. Therefore, a study was conducted to assess the mobility of air in the premises of typical apartments when using such devices at various characteristic air flow rates.

**Materials and methods.** The CFD method of modelling the operation of mechanical supply and exhaust ventilation based on a compact regenerator in a two-room apartment is applied. The Ansys Fluent software package was used for modelling. The isothermal formulation of the problem is considered. The turbulence model is adopted by  $k$ - $\omega$  ( $k$ - $\omega$ ).

**Results.** The distribution fields of air velocity in the plan of rooms at different heights with different characteristic air flow rates are presented. An increase in indoor air mobility is shown with an increase in ventilation performance. The combined effect of mechanical decentralized ventilation and natural centralized exhaust ventilation of residential buildings is shown.

**Conclusions.** Based on the simulation results, it was determined that when using ventilation devices of the SSRHE type, it is possible to ensure the required air mobility in the premises, which contributes to effective air exchange. It is determined that the permissible indoor air mobility is set for air flow rates in the range of 50–100 m<sup>3</sup>/h. The results of the study can be used in the design of mechanical ventilation systems for residential multi-apartment buildings based on compact SSRHE-type installations, as well as in the combination of natural and mechanical ventilation. In the future, it is necessary to conduct a study of air distribution for other types of apartments, which will expand the database to develop recommendations and create a methodology for designing ventilation systems based on compact reversible devices. Experimental confirmation of the simulation is also required.

**KEYWORDS:** SSRHE, heat exchanger, air distribution, reversible ventilation, air velocity

*Acknowledgements.* The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). The authors express gratitude to anonymous reviewers.

**FOR CITATION:** Monarkin N.N., Iakovlev V.A., Monarkina T.V. Numerical study of air distribution in apartment premises using compact regenerative heat exchangers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2): 246-256. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.246-256 (rus.).

*Corresponding author:* Nikolay N. Monarkin, [nikolay-monarkin@yandex.ru](mailto:nikolay-monarkin@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

В жилых зданиях на территории России и многих других стран в подавляющем большинстве применяются естественные системы вентиляции квартир [1]. Это вызвано, в первую очередь, простотой их конструкции и низкими затратами на создание и эксплуатацию [2].

Однако системы естественной вентиляции имеют ряд недостатков, к которым относятся [3]:

- неустойчивая работа, сопряженная с прямой зависимостью качества проветривания от параметров наружного воздуха;
- сложность регулирования производительности;
- сложность или невозможность нагрева приточного воздуха, его очистки и прочей обработки;
- сложность или невозможность утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Исходя из вышеуказанных недостатков, в жилых зданиях существуют проблемы, связанные с нарушением микроклимата из-за некачественной вентиляции, а также вызванные высокими потерями тепловой энергии с вентиляционными выбросами.

Одним из решений указанных проблем может быть применение компактных вентиляционных устройств с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. Такие компактные устройства обладают устойчивостью, как механические системы, не требуют большого пространства для размещения, имеют низкое энергопотребление, а также способны утилизировать теплоту вытяжного воздуха. Наиболее энергетически эффективными являются устройства,

основанные на принципе действия регенеративного теплообменного аппарата, поэтому их, в том числе, называют регенераторами или более емко стационарными переключающимися регенеративными теплоутилизаторами (СПРТ) [4, 5]. Подобные регенераторы способны возвращать в помещение до 90 % тепловой энергии, теряемой с вентиляционными выбросами, при этом затраты на их установку и использование в разы ниже по сравнению с центральными системами вентиляции [6]. Такие устройства позволяют создавать устойчивую вентиляцию помещений с возможностью регулирования производительности и утилизации теплоты вытяжного воздуха. Также они дают возможность осуществлять очистку приточного воздуха как от крупных пылевых частиц, так и от микроскопических частиц путем применения фильтров высокой эффективности.

Кроме того, применение СПРТ дает неявный социальный эффект, заключающийся в профилактике несчастных случаев выпадения детей из окон высотных зданий, так как использование таких устройств исключает необходимость открытия окон для проветривания помещений.

Учитывая низкую производительность (до 100 м<sup>3</sup>/ч) СПРТ, возникает вопрос эффективности воздухообмена и воздухораспределения при их применении, т.е. насколько эффективно приточный воздух растворяется во внутреннем, достаточна ли подвижность воздуха, присутствуют ли в помещении застойные зоны и т.д.

С точки зрения ассимиляции вредных веществ эффективность работы СПРТ доказана эксперимен-

тально в работе [7], где показано снижение уровня концентрации углекислого газа до допустимых значений для различных конфигураций использования СПРТ. Это позволяет сделать вывод о том, что при применении СПРТ приточный воздух эффективно перемешивается во внутреннем воздухе помещения, неся ассимилирующую функцию.

Однако вопрос обеспечения достаточной подвижности воздуха при использовании СПРТ остается открытым. На подвижность воздуха в помещении влияют вертикальные конвективные потоки от нагретых поверхностей, вентиляционные струи, движение и дыхание человека и т.д. Высокая скорость движения воздуха в помещении вызывает негативный эффект сквозняка, а неподвижный воздух создает вокруг человека оболочку из перегретого и насыщенного водяными парами воздуха, что также оказывает негативное влияние. К тому же малоподвижный воздух способствует накоплению и локализации вредных веществ в отдельных частях объема помещения, в том числе повышенному уровню углекислоты вокруг человека. Для жилых комнат согласно ГОСТ 30494–2011<sup>1</sup> скорость движения воздуха для холодного периода ограничивается значением 0,15 м/с по оптимальной норме и 0,2 м/с по допустимой, для теплого периода указаны значения 0,2 и 0,3 м/с соответственно.

Экспериментально определять скорость движения воздуха во множестве точек внутреннего объема помещений сложно и трудоемко, поэтому для оценки применяется метод вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование). Точное и эффективное моделирование воздушного потока способствует обеспечению теплового комфорта и качества воздуха в помещении. CFD-моделирование широко используется для визуализации воздушных потоков в жилых зданиях, примерами служат работы коллег из Китая [8–10], Европы [11, 12], России [13, 14]. Однако моделирование воздушораспределения в типовых российских квартирах для малопроизводительной механической вентиляции в существующих работах не рассматривается.

Цель исследования — оценка подвижности воздуха в помещениях типовых квартир при использовании компактных вентиляционных устройств типа СПРТ при различных характерных расходах воздуха.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применен метод CFD-моделирования работы механической приточно-вытяжной вентиляции на основе компактного регенератора в двухкомнатной квартире. CFD-моделирование состоит из следующих основных этапов:

- создание геометрической модели;

<sup>1</sup> ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/norm\\_doc/norm/gost30494.pdf](https://www.abok.ru/for_spec/norm_doc/norm/gost30494.pdf)

- формирование сетки — разбиение модели на мелкие ячейки (сетки), что обеспечивает точность расчетов;

- задание граничных условий — установка входных и выходных потоков, температурных и тепловых условий;

- решение уравнений — численный расчет уравнений Навье – Стокса для определения потоков и температур;

- анализ результатов — визуализация распределения воздуха в геометрии модели.

Рассматривается геометрия типовой двухкомнатной квартиры в многоквартирном здании (рис. 1).

Размеры и площади помещений для выбранной конфигурации квартиры приведены на рис. 2. Приточно-вытяжные устройства типа СПРТ располагаются в наружной стене сбоку от окна на высоте 2,3 м от пола. Такое расположение характерно для исследуемых устройств, а именно предполагает размещение притока на уровне или выше роста человека для снижения эффекта сквозняка.

Также, согласно геометрии на кухне, в туалете и ванной комнате предполагается наличие естественной вытяжной вентиляции, характерной для квартир в многоэтажных зданиях.

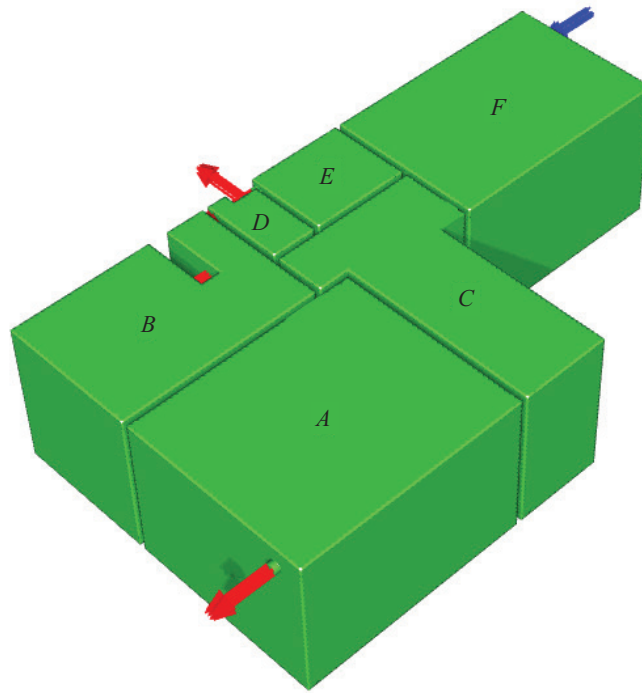
Моделирование осуществляется с помощью программного комплекса Ansys Fluent. Применяемые методы и настройки представлены в таблице [15–20].

Расход воздуха при моделировании принимался в соответствии с рекомендуемым минимальным расходом наружного воздуха на одного человека для жилых помещений согласно СП 60.13330.2020<sup>2</sup>. Принято минимальное значение для помещений с естественным проветриванием 30 м<sup>3</sup>/ч, которое затемкратно увеличивалось. Воздухообмен, равный 30 м<sup>3</sup>/ч, соответствует нахождению одного человека в помещении, 60 м<sup>3</sup>/ч — двум людям и т.д. Согласно Жилищному кодексу РФ<sup>3</sup>, средняя норма площади на человека в квартире зависит от региона, вида жилья и статуса претендента и составляет 15–18 м<sup>2</sup>. Учитывая это, можно принять, что двухкомнатные квартиры рассчитаны на 2–3 жильцов.

Так как СПРТ имеет переключающийся режим работы, необходимо понимать, что общий воздухообмен, м<sup>3</sup>/ч, при использовании одного устройства будет составлять половину от производительности притока или вытяжки при условии их равенства. В случае применения двух СПРТ с одинаковой производительностью, которые будут работать в противофазе, общий воздухообмен будет равен расходу одного устройства.

<sup>2</sup> СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.

<sup>3</sup> Жилищный кодекс Российской Федерации. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51057/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51057/)



**Рис. 1.** Геометрия исследуемой квартиры: *A* — первая жилая комната; *B* — кухня; *C* — прихожая (коридор); *D* — туалет; *E* — ванная комната; *F* — вторая жилая комната

**Fig. 1.** Geometry of the apartment: *A* — first living room; *B* — kitchen; *C* — entrance hall (corridor); *D* — toilet; *E* — bathroom; *F* — second living room

При моделировании приняты следующие допущения:

- используется изотермическая постановка задачи;
- перепадом давлений между наружной и внутренней средой пренебрегаем;
- прочие приточные и вытяжные потоки воздуха отсутствуют;
- наличием мебели и прочих бытовых предметов пренебрегаем.

Использование изотермической постановки задачи объясняется тем, что СПРТ за счет высокой энергетической эффективности в холодный период нагревает приточный воздух до температуры, близкой к температуре внутреннего воздуха, а в теплый период аналогично охлаждает приточный воздух [4]. То есть регенератор практически полностью сглаживает влияние температуры наружной среды на температуру помещения, что сводит влияние неизоотермичности приточной струи к минимуму и позволяет пренебрегать этим в расчетах.

Перепад давлений между наружной и внутренней средой в реальности оказывает влияние на производительность СПРТ и их энергетическую эффективность вследствие нарушения баланса между притоком и вытяжкой. Воздействие естественной вентиляции зависит от этажа, на котором располагается квартира. Чем ниже этаж, тем сильнее влияние естественной тяги, увеличивающей производительность СПРТ. И наоборот, на верхних этажах возмож-

на картина опрокидывания естественной системы. Согласно исследованию [21], несбалансированные режимы работы регенераторов, на которые влияет естественная вентиляция, приводят к низкой тепловой эффективности, различным скоростям воздухообмена на разных этажах здания и не могут быть проигнорированы в многоэтажных зданиях. Для решения этой проблемы следует выбирать новые системы управления и компоненты для такого типа децентрализованных устройств. Например, в труде [22] благодаря специальной стратегии управления работой СПРТ были сбалансированы этапы работы устройства, при этом эффективность рекуперации теплоты увеличилась более чем на 10 % по сравнению со стандартным режимом функционирования.

Дополнительными приточными и вытяжными потоками воздуха в реальной квартире могут быть потоки через окна и входные двери. Такие потоки могут оказывать влияние на воздухообмен и эффективность работы СПРТ. Однако применение СПРТ исключает необходимость проветривания помещений через окна. Кроме того, современные оконные и дверные конструкции имеют высокую герметичность, что позволяет также пренебречь фактором прочих воздушных потоков.

Учет в помещениях мебели и бытовых предметов значительно усложняет моделирование воздухораспределения по нескольким причинам:

- усложнение геометрии: мебель, бытовая техника и предметы интерьера создают множество пре-

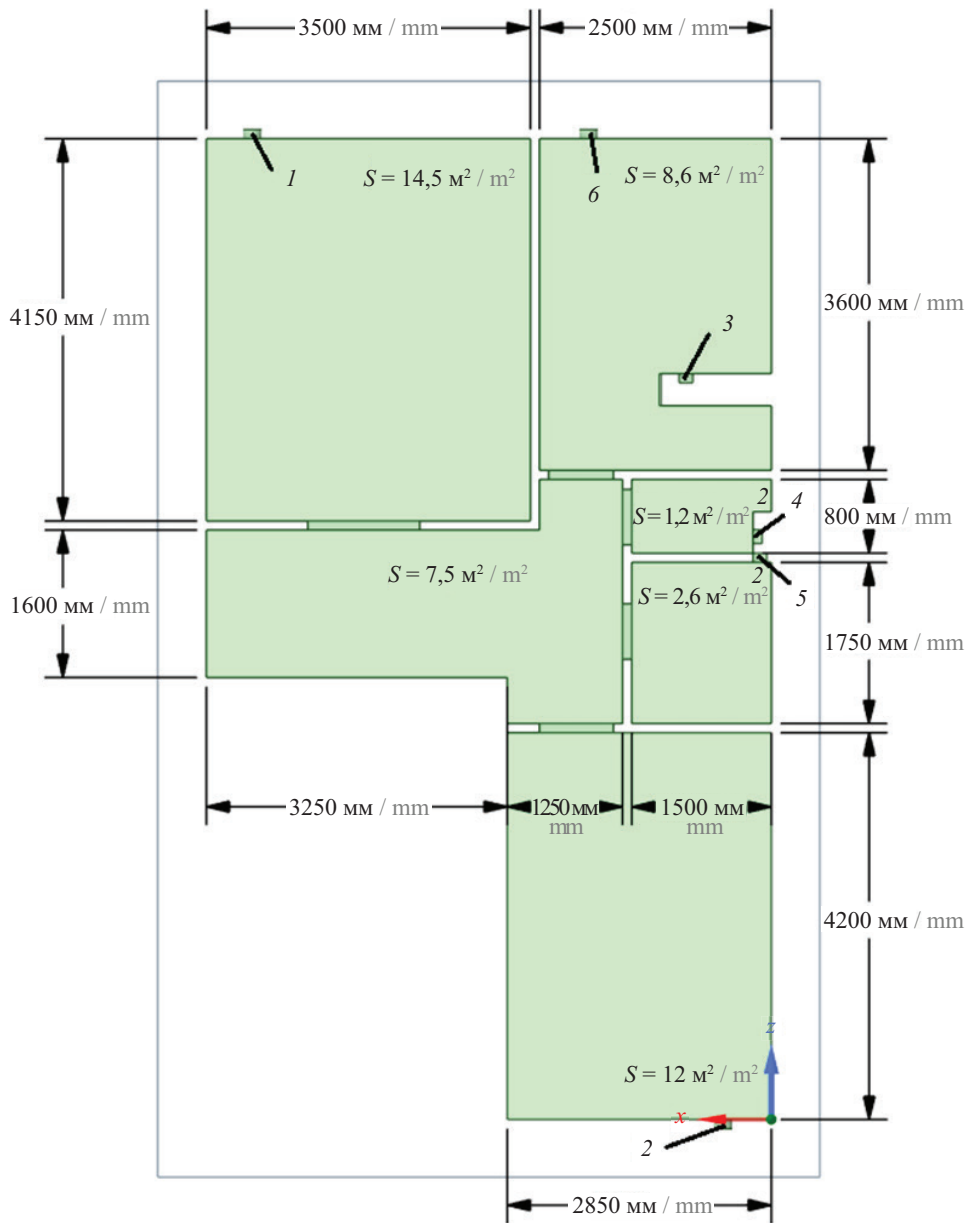


Рис. 2. План исследуемой квартиры: 1, 2 — места расположения регенераторов; 3–5 — вытяжные отверстия естественной вентиляции на кухне и в санузле; 6 — приток для компенсации естественной вытяжки

Fig. 2. The plan of the apartment: 1, 2 — locations of the regenerators; 3–5 — exhaust vents of natural ventilation in the kitchen and bathroom; 6 — inflow to compensate for natural exhaust

пятствий и узких проходов, что затрудняет расчет потоков воздуха;

- повышение турбулентности: наличие мебели вызывает локальные турбулентные зоны, завихрения и изменение направления потоков, что трудно точно моделировать;
- взаимодействие с поверхностями: мебель и предметы могут влиять на теплообмен и создавать дополнительные источники тепла или холода, что в итоге влияет на распределение скорости воздуха;
- отсутствие точных данных: параметры расположения и размеров мебели, а также их тепловые характеристики могут быть разнообразными, суще-

ственно отличающимися для каждой рассматриваемой квартиры, меняющимися со временем, а также зачастую неизвестными;

- высокая вычислительная сложность: моделирование с учетом всех препятствий требует сложных численных методов и значительных ресурсов.

В результате моделирование воздухораспределения в квартире с мебелью — трудоемкая задача, требующая использования сложных методов численного моделирования и вычислительных мощностей. В постановке рассматриваемой задачи учет таких факторов является нерациональным для получения общей картины результатов.

Настройки программного комплекса Ansys Fluent

Programme configurations Ansys Fluent

Тип сетки Type of Mesh	Полиэдральная Polyhedral
Количество элементов Number of elements	> 1 млн > 1 million
Настройка «Offset method tape» Configure the Offset tape method	Плавный переход Smooth-transition
Количество слоев в пограничном слое The number of layers in the boundary layer	6
Модель вязкости Viscosity model	$k-\omega$ (2 уравнения), SST $k-\omega$ (2 equations), SST
Методы решателя Solver Methods	Соединение давления и скорости: Pressure-Velocity Coupling: • scheme – coupled Пространственная дискретизация: Spatial Discretization: • gradient – Green-Gauss Node Based; • Pressure – PRESTO; • momentum – Third-Order MUSCL; • turbulent kinetic energy – Third-Order MUSCL; • specific dissipation rate – Third-Order MUSCL

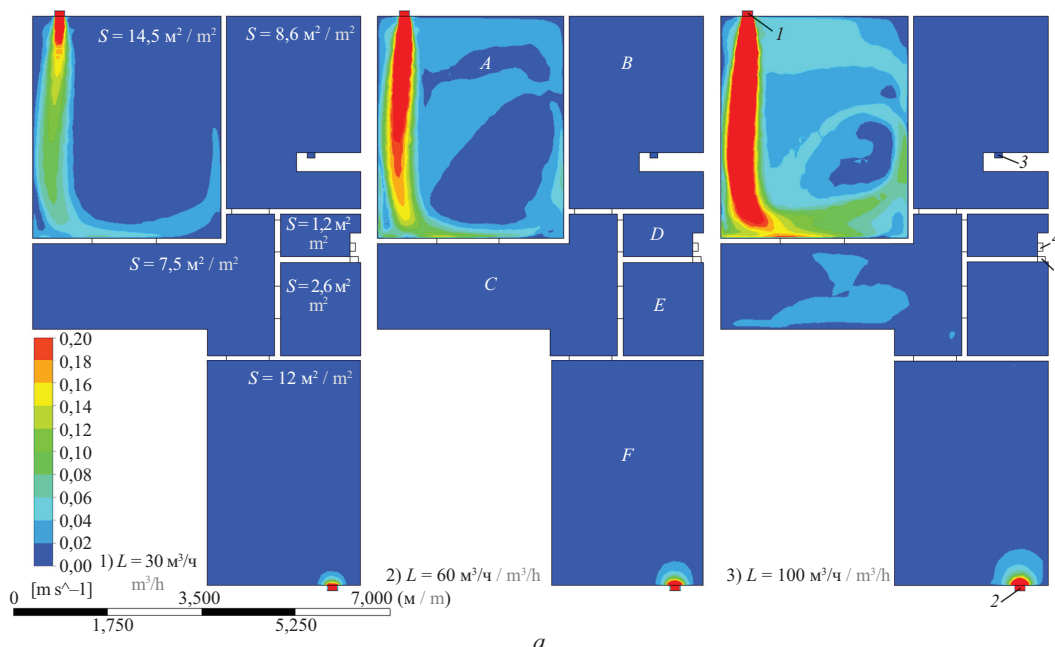
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

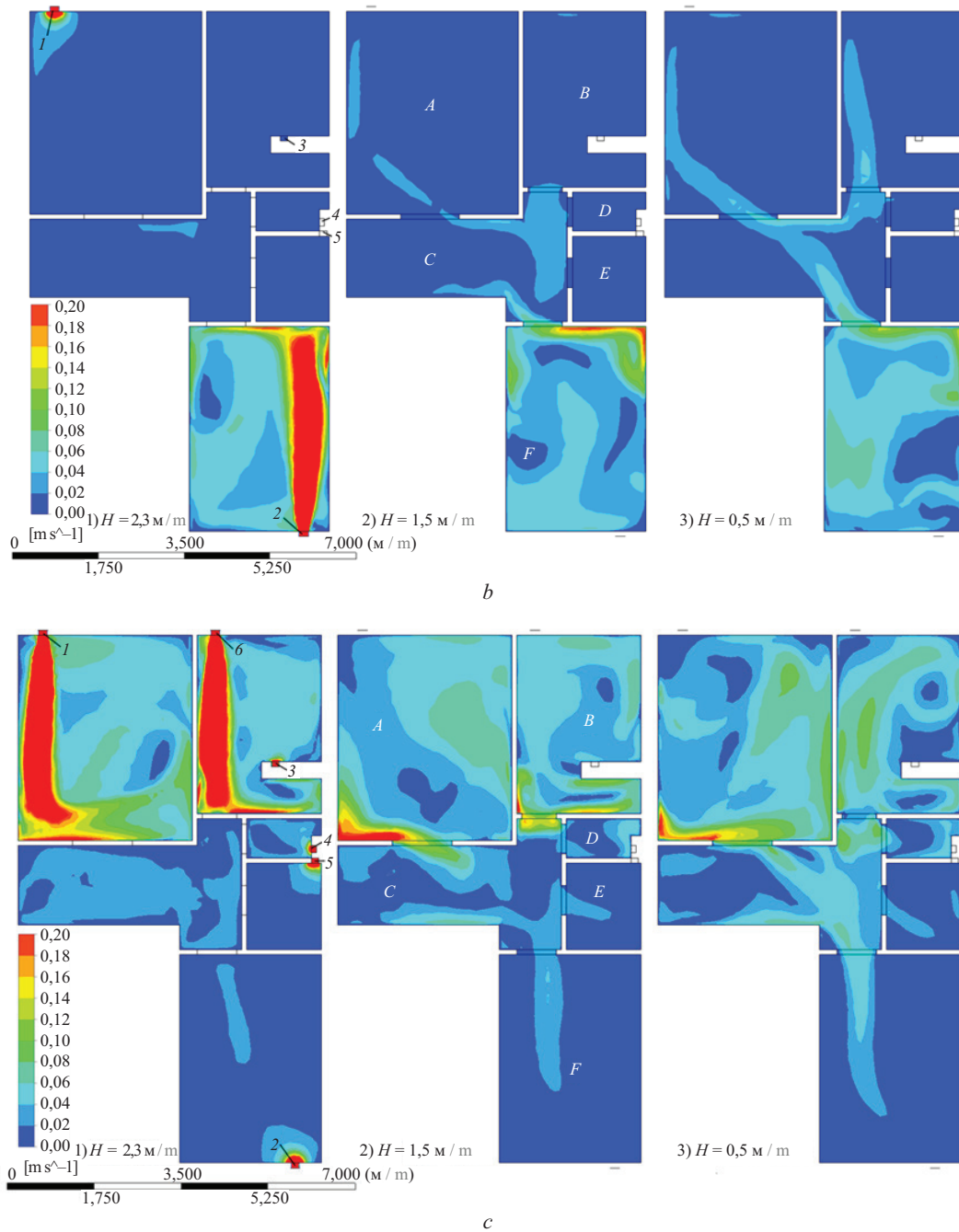
В качестве результатов исследования приведены поля скоростей движения воздуха в плане квартиры на фиксированной высоте.

На рис. 3, а показаны поля распределения скорости движения воздуха в плане квартиры на высоте 2,3 м от пола. Представлены три случая иллюстрации подачи и удаления воздуха для трех различных расходов воздуха 30, 60 и 100 м³/ч. Воздух подается в комнату А, а удаляется из комнаты F. Расходы приточного и вытяжного воздуха равны для каждого случая. При моделировании в качестве граничных условий заданы: для приточного 1 и вытяжного 2 проемов

массовый расход воздуха, рассчитанный через указанный объемный расход и плотность воздуха, равную 1,2 кг/м³; для вытяжных проемов на кухне и санузле 3–5 — нулевое давление (свободный выход). На рис. 3, а скорость движения воздуха ограничена максимальным значением 0,2 м/с для более детального отображения низкоскоростных потоков.

Для расхода 30 м³/ч наблюдается крайне низкая подвижность воздуха в помещении, где осуществляется приток. Максимальная скорость движения воздуха видна только в самом начале струи. Струя быстро затухает и не создает необходимой подвижности воздуха в этом помещении. В остальных помещениях воздух неподвижен. Всасывающий факел





**Рис. 3.** Поля распределения скорости движения воздуха в плане: *a* — на высоте 2,3 м при подаче воздуха в комнату *A* и удалении из комнаты *F*; *b* — на различных высотах при подаче воздуха в комнату *F* и удалении из комнаты *A*; *c* — на различных высотах при подаче воздуха в помещения *A* и *B* и удалении из помещений *B*, *D*, *E*, *F*

**Fig. 3.** Air velocity distribution fields in the plan: *a* — at a height of 2.3 m when air is supplied to room *A* and removed from room *F*; *b* — at different heights when air is supplied to room *F* and removed from room *A*; *c* — at different heights when air is supplied to rooms *A* and *B* and removed from rooms *B*, *D*, *E*, *F*

не оказывает влияния на подвижность воздуха в помещении.

Для расхода 60 м<sup>3</sup>/ч воздух в помещении *A* более подвижен по сравнению с предыдущим случаем. Струя с такой произвольностью уже способна вовлекать в движение окружающий ее внутренний воздух. Скорость движения воздуха в основном объеме помещения меняется от 0 до 0,05 м/с, что может быть оценено как минимальный допустимый уро-

вень подвижности воздуха. В остальном картина воздухораспределения аналогична предыдущему случаю.

Для расхода 100 м<sup>3</sup>/ч подвижность воздуха высокая — около 0,05–0,1 м/с. Воздух активно циркулирует по объему помещения *A*, приточная струя создает круговое движение воздуха внутри помещения. Наблюдается переток воздуха через коридор *C* в комнату *F*.

С точки зрения обновления воздуха в помещении, т.е. замещения отработавшего внутреннего воздуха свежим приточным, наличие зон циркуляции является негативным эффектом. Так как обмен между свежим воздухом приточных струй и зонами циркуляции затруднен, зоны циркуляции становятся застойными зонами, в которых параметры воздуха будут отклоняться от требуемых. Вариантом снижения циркуляции воздуха может быть отказ от компактных прямооточных струй в пользу, например, веерных путем замены типа воздухораспределителя.

Кроме того, по рис. 3, *a* видно, что при характерном размещении СПРТ сбоку от оконного проема происходит настиление приточной струи на стену, что увеличивает ее дальнобойность и может способствовать увеличению подвижности воздуха.

Необходимо отметить, что для всех приведенных случаев отмечается нулевая скорость движения воздуха в вытяжных отверстиях 3–5. Это может быть объяснено тем, что при заданных одинаковых расходах приточного и вытяжного воздуха в задаче устанавливается баланс массы. При задании ненулевого значения давления в данных проемах картина движения воздуха не меняется.

При отображении полей скорости на различной высоте картина воздухораспределения будет несколько меняться. На рис. 3, *b* приведены скоростные поля для трех уровней: 2,3, 1,5 и 0,5 м от уровня пола. Здесь воздух подается в помещение *F* и удаляется из помещения *A*, т.е. картина воздухообмена меняется на противоположную, что соответствует периодическому характеру работы СПРТ. Остальные настройки для данного случая полностью совпадают с предыдущим.

Согласно рис. 3, *b*, снижение высоты иллюстрирует перетекание воздуха из помещения, в которое он подается, в соседние помещения. В том числе наблюдается поступление воздуха через коридор на кухню *B*. Предположительно, данный эффект перетекания воздуха будет усиливаться при снижении температуры притока.

Для нагруженных условий могут требоваться повышенные значения воздухообмена. Например, при размещении четырех человек в такой квартире: по два человека в каждой жилой комнате, а также при наличии газовой плиты на кухне потребуются следующие расходы воздуха согласно СП 54.13330.2022<sup>4</sup>:

- для комнат *A* и *F*: 120 м<sup>3</sup>/ч для создания воздухообмена 60 м<sup>3</sup>/ч в каждой комнате;
- для кухни *B*: 100 м<sup>3</sup>/ч;
- для туалета *D*: 25 м<sup>3</sup>/ч;
- для ванной комнаты *E*: 50 м<sup>3</sup>/ч.

На рис. 3, *c* представлены результаты моделирования для указанных условий, при этом при-

нято, что приток в кухню компенсируется вытяжкой из ванной, туалета, а также кухни, т.е. расходы по выходам приняты следующими: 3 — 25 м<sup>3</sup>/ч, 4 — 25 м<sup>3</sup>/ч, 5 — 50 м<sup>3</sup>/ч.

Учитывая переключающийся режим работы СПРТ в жилых комнатах, подвижность воздуха во всех помещениях квартиры может считаться достаточной. Наблюдается активное перетекание воздуха между комнатами, что обеспечивает эффективный воздухообмен во всей квартире. Нахождение человека в зоне приточной струи может вызывать дискомфорт, что опять может быть решено заменой воздухораспределителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение CFD-моделирования позволяет визуализировать скоростные поля движения вентиляционного воздуха в помещениях зданий. Такие модели помогают оптимизировать качество воздуха в помещении, тепловой комфорт и энергоэффективность применяемого оборудования, способствуя устойчивому проектированию и эксплуатации зданий. CFD-моделирование дает возможность прогнозировать характеристики воздухораспределения, что может быть использовано для улучшения конструкции вентиляционных установок и расположения приточных и вытяжных устройств, чтобы получить наилучшие результаты в создании комфорта воздушной среды помещения.

В результате проведенного исследования выявлены особенности распределения скорости движения воздуха при различных режимах работы системы приточно-вытяжной вентиляции на основе компактных устройств типа СПРТ в типовой двухкомнатной квартире. Анализ показал, что при низких значениях воздухообмена (30 м<sup>3</sup>/ч) отмечается недостаточная подвижность воздуха, что негативно сказывается на эффективности воздухообмена и, как итог, комфорте человека. При увеличении расхода до 60 м<sup>3</sup>/ч наблюдается улучшение циркуляции, достигающее минимально допустимых значений скоростей, а при 100 м<sup>3</sup>/ч и более обеспечивается активная циркуляция и эффективное обновление воздуха в помещениях. Важным фактором служит расположение приточных устройств, которое влияет на картину воздухораспределения в целом и ограничено особенностью конструкции изучаемых устройств. Моделирование при различных высотах продемонстрировало, что режим периодической работы системы способствует перетеканию воздуха между помещениями, что обеспечивает достаточный воздухообмен при условии правильного выбора режима работы вентиляции. При повышенных расходах воздуха могут требоваться мероприятия по избавлению от эффекта сквозняка и застойных зон, например, путем применения специальных воздухораспределителей.

<sup>4</sup> СП 54.13330.2022. СНиП 31-01–2003. Здания жилые многоквартирные. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/223332/>

В целом результаты подтверждают эффективность использования компактных установок типа СПРТ и возможность создания комфортных условий микроклимата в помещениях с их помощью. При этом определена необходимость оптимизации конструкции и режима работы таких систем вентиляции для повышения комфорта и качества воздуха в жилых помещениях.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании механических систем вен-

тиляции жилых многоквартирных зданий на основе компактных установок типа СПРТ, а также при сочетании естественной и механической вентиляции.

В дальнейшем следует провести исследование воздухораспределения для других видов и типов квартир, а также других видов воздухораспределителей, что позволит расширить базу данных для выработки рекомендаций и создания методики проектирования систем вентиляции на основе компактных реверсивных устройств.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Malyavina E., Agakhanova K.* Computational study of a natural exhaust ventilation system during the heating period // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 116–124. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_12
2. *Кутайцева Е.Х., Малявина Е.Г.* Естественная вентиляция жилых зданий // *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 1999. № 3. С. 35–40. EDN TYXBBV.
3. *Куреев А.* Вентиляция в многоквартирных домах: проблемы и перспективы // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2022. № 6 (246). С. 66–68. EDN RIZKMA.
4. *Monarkin N., Monarkina T.* Experimental Research of a Regenerative Heat Exchanger // *Processes*. 2022. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.3390/pr10010100. EDN SWPPKR.
5. *Монаркин Н.Н.* Обеспечение требуемого воздухообмена в помещениях при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 3. С. 455–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462. EDN ZXZSIV.
6. *Zender-Swiercz E.* A review of heat recovery in ventilation // *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 6. P. 1759. DOI: 10.3390/en14061759. EDN VNRBFP.
7. *Monarkin N.* Reversible decentralized ventilation: Experimental determination of efficiency by carbon dioxide level // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. P. 107675. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107675. EDN UNDJBA.
8. *Li Y., Nielsen P.V.* CFD and ventilation research // *Indoor Air*. 2011. Vol. 21. Issue 6. Pp. 442–453. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x
9. *Quang T.V., Doan D.T., Phuong N.L., Yun G.Y.* Data-driven prediction of indoor airflow distribution in naturally ventilated residential buildings using combined CFD simulation and machine learning (ML) approach // *Journal of Building Physics*. 2024. Vol. 47. Issue 4. Pp. 439–471. DOI: 10.1177/17442591231219025
10. *Van Quang T., Phuong N.L., Doan D.T.* Efficient Prediction of Indoor Airflow in Naturally Ventilated Residential Buildings Using a CFD-DNN Model Approach // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Pp. 759–770. DOI: 10.1007/978-981-99-9947-7\_76
11. *Nielsen P.V.* Fifty years of CFD for room air distribution // *Building and Environment*. 2015. Vol. 91. Pp. 78–90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035
12. *Raczkowski A., Suchorab Z., Brzyski P.* Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 252. P. 04007. DOI: 10.1051/mateconf/201925204007
13. *Агафонова В.В., Скибин А.П., Волков В.Ю.* Моделирование воздухообмена в офисном помещении при применении микроперфорированного текстильного воздуховода // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. № 2. С. 52–57. DOI: 10.35776/VST.2021.02.06. EDN UOQQLZ.
14. *Засимова М.А., Маринова А.А., Иванов Н.Г., Подмаркова А.Д.* Численное моделирование воздушных потоков при обтекании сидящего теплового манекена в помещении с перемешивающей вентиляцией // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2022. Т. 15. № 3. С. 111–131. DOI: 10.18721/JPM.15309. EDN BBMIUJ.
15. *Teodosiu R., Ilie V., Teodosiu C.* Computational Fluid Dynamics prediction of indoor air quality // *International Journal of Material Science & Engineering*. 2014.
16. *Du L., Yang C., Dominy R., Yang L., Hu C., Du H. et al.* Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 159. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.020
17. *Küçüktopçu E., Cemek B., Simsek H.* Modeling Environmental Conditions in Poultry Production: Computational Fluid Dynamics Approach // *Animals*. 2024. Vol. 14. Issue 3. P. 501. DOI: 10.3390/ani14030501
18. *Cao Q., Liu M., Li X., Lin C., Wei D., Ji S. et al.* Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD // *Building and Environment*. 2022. Vol. 207. P. 108413. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108413

19. *Ghibeche I., Nourani A., Naas T.T., Benziouche S.E., Buchholz M., Buchholz R.* A computational fluid dynamics (CFD) modeling in a new design of closed greenhouse // *Studies in Engineering and Exact Sciences*. 2024. Vol. 5. Issue 1. Pp. 649–666. DOI: 10.54021/seesv5n1-037

20. *Abu-Zidan Y., Mendis P., Gunawardena T.* Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. Issue 4. P. e06723. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06723

21. *Penev A., Tsokov L.* Influence of buoyancy forces in multi-storey buildings on the efficiency of a regenerative air handling unit with heat recovery // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1032. Issue 1. P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1032/1/012029

22. *Koper P.* Influence of Control Strategy on Heat Recovery Efficiency in a Single-Duct Periodic Ventilation Device // *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 22. P. 5801. DOI: 10.3390/en17225801

Поступила в редакцию 4 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 7 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Николаевич Монаркин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 831464, Scopus: 56027718900, ResearcherID: O-9932-2017, ORCID: 0000-0002-4411-5753; nikolay-monarkin@yandex.ru;

**Виктор Александрович Яковлев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения и вентиляции; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 248647, ORCID: 0000-0001-6639-598X; yakovlevspv@rambler.ru;

**Татьяна Владимировна Монаркина** — аспирант кафедры теплогазоводоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1131504, Scopus: 57396272900, ORCID: 0009-0005-5822-1628; monarkinatv@vogu35.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Malyavina E., Agakhanova K. Computational study of a natural exhaust ventilation system during the heating period. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 116-124. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_12

2. Kitaytseva E.Kh., Malyavina E.G. Natural ventilation of residential buildings. *AVOK*. 1999; 3:35-40. EDN TYXBBV. (rus.).

3. Kireev A. Ventilation in apartment buildings: problems and prospects. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2022; 6(246):66-68. EDN RIZKMA. (rus.).

4. Monarkin N., Monarkina T. Experimental Research of a Regenerative Heat Exchanger. *Processes*. 2022; 10(1). DOI: 10.3390/pr10010100. EDN SWPPKR.

5. Monarkin N.N. Maintenance of the required indoor air exchange rate by using compact regenerative heat exchangers. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(3): 455-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462. EDN ZXZSIV. (rus.).

6. Zender-Swiercz E. A review of heat recovery in ventilation. *Energies*. 2021; 14(6):1759. DOI 10.3390/en14061759. EDN VNRBFP.

7. Monarkin N. Reversible decentralized ventilation: Experimental determination of efficiency by car-

bon dioxide level. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107675. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107675. EDN UNDJBA.

8. Li Y., Nielsen P.V. CFD and ventilation research. *Indoor Air*. 2011; 21(6):442-453. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x

9. Quang T.V., Doan D.T., Phuong N.L., Yun G.Y. Data-driven prediction of indoor airflow distribution in naturally ventilated residential buildings using combined CFD simulation and machine learning (ML) approach. *Journal of Building Physics*. 2024; 47(4):439-471. DOI: 10.1177/17442591231219025

10. Van Quang T., Phuong N.L., Doan D.T. Efficient Prediction of Indoor Airflow in Naturally Ventilated Residential Buildings Using a CFD-DNN Model Approach. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 759-770. DOI: 10.1007/978-981-99-9947-7\_76

11. Nielsen P.V. Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*. 2015; 91:78-90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035

12. Raczkowski A., Suchorab Z., Brzyski P. Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 252:04007. DOI: 10.1051/mateconf/201925204007

13. Agafonova V., Skibin A., Volkov V. Modeling air exchange in office premises using a microperforated fabric air duct. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021; 2:52-57. DOI: 10.35776/VST.2021.02.06. EDN UOQQLZ. (rus.).
14. Zasimova M.A., Marinova A.A., Ivanov N.G., Podmarkova A.D. Numerical simulation of turbulent airflow and heat transfer around a seated thermal manikin in the room with mixing ventilation. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022; 15(3):111-131. DOI: 10.18721/JPM.15309. EDN BBMIUJ. (rus.).
15. Teodosiu R., Ilie V., Teodosiu C. Computational Fluid Dynamics prediction of indoor air quality. *International Journal of Material Science & Engineering*. 2014.
16. Du L., Yang C., Dominy R., Yang L., Hu C., Du H. et al. Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019; 159:1-15. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.020
17. Küçüktopçu E., Cemek B., Simsek H. Modeling Environmental Conditions in Poultry Production: Computational Fluid Dynamics Approach. *Animals*. 2024; 14(3):501. DOI: 10.3390/ani14030501
18. Cao Q., Liu M., Li X., Lin C., Wei D., Ji S. et al. Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD. *Building and Environment*. 2022; 207:108413. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108413
19. Ghibeche I., Nourani A., Naas T.T., Benziouche S.E., Buchholz M., Buchholz R. A computational fluid dynamics (CFD) modeling in a new design of closed greenhouse. *Studies in Engineering and Exact Sciences*. 2024; 5(1):649-666. DOI: 10.54021/sees-v5n1-037
20. Abu-Zidan Y., Mendis P., Gunawardena T. Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings. *Heliyon*. 2021; 7(4):e06723. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06723
21. Penev A., Tsokov L. Influence of buoyancy forces in multi-storey buildings on the efficiency of a regenerative air handling unit with heat recovery. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1032(1):012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1032/1/012029
22. Koper P. Influence of Control Strategy on Heat Recovery Efficiency in a Single-Duct Periodic Ventilation Device. *Energies*. 2024; 17(22):5801. DOI: 10.3390/en17225801

Received June 4, 2024.

Adopted in revised form on October 7, 2025.

Approved for publication on December 7, 2025.

**B I O N O T E S :** **Nikolay N. Monarkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas and Water Supply; **Vologda State University**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 831464, Scopus: 56027718900, ResearcherID: O-9932-2017, ORCID: 0000-0002-4411-5753; nikolay-monarkin@yandex.ru;

**Viktor A. Iakovlev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Heat and Gas Supply and Ventilation; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 248647; ORCID: 0000-0001-6639-598X; yakovlevspv@rambler.ru;

**Tat'yana V. Monarkina** — postgraduate student of the Department of Heat and Gas and Water Supply; **Vologda State University**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 1131504, Scopus: 57396272900, ORCID: 0009-0005-5822-1628; monarkinatv@vogu35.ru.

*Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268

## Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока

Юлия Васильевна Елистратова, Илья Валерьевич Крюков,  
Дмитрий Сергеевич Гайдаш, Варвара Юрьевна Коверина,  
Светлана Сергеевна Юрьева

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);  
г. Белгород, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В современном строительстве все большее предпочтение отдается системам вентиляции с механическим побуждением. С учетом высоких потерь давления в фасонных элементах системы вентиляции необходимо совершенствование геометрии их конструкции. Особенно это касается тройников приточной системы вентиляции, в которых происходит разделение потока, приводящее к большим потерям энергии при деформации потока. Цель исследования — численное моделирование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения для установления коэффициента местного сопротивления, определение очертаний вихревых зон в месте разделения потока воздуха и коэффициента местного сопротивления оптимизированного приточного тройника, построенного с учетом очертания вихревой зоны в области деформации потока.

**Материалы и методы.** Определение коэффициента местного сопротивления стандартного симметричного приточного тройника, очертания вихревых зон в месте разделения потока, коэффициента местного сопротивления оптимизированного тройника проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6. Для численного решения уравнений неразрывности и Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, применялась «стандартная»  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности с пристеночными функциями.

**Результаты.** Установлено значение коэффициентов местного сопротивления стандартного тройника, которое хорошо согласуется с известными данными. По очертаниям вихревой зоны в области деформации потока выполнялись оптимизация геометрии конструкции тройника путем скругления стенки и последующее численное исследование.

**Выводы.** Выявлено, что изменение конструкции стандартного приточного тройника посредством скругления стенки в области деформации потока позволяет снизить гидравлическое сопротивление на 11,9 %. Результаты исследования представляют научный и практический интерес при разработке оптимизированной конструкции тройника.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вентиляция, энергосбережение в вентиляции, симметричный тройник, оптимизированный тройник, коэффициент местного сопротивления, снижение потерь давления, вычислительная гидродинамика

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-29-01023 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-01023/>) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Гайдаш Д.С., Коверина В.Ю., Юрьева С.С. Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 257–268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268

Автор, ответственный за переписку: Юлия Васильевна Елистратова, [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru).

## Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation

Yulia V. Elistratova, Ilya V. Kryukov, Dmitrii S. Gaidash,  
Varvara Yu. Koverina, Svetlana S. Iureva

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);  
Belgorod, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In modern construction, mechanical ventilation systems are becoming increasingly popular. Given the high-pressure losses in the shaped elements of ventilation systems, it is necessary to improve their design geometry. This is especially true for supply ventilation system tees, where flow separation occurs, leading to significant energy losses due to flow deformation. The aim of the study is to numerically simulate air flow in a symmetrical square-section supply tee to determine the local resistance coefficient, to determine the contours of vortex zones at the point of air flow separation and the local resistance coefficient of an optimized supply tee constructed taking into account the contour of the vortex zone in the flow deformation area.

**Materials and methods.** The pressure loss coefficient of a standard symmetric supply-air tee, the area of vortex zone formed in the flow separation region, and the pressure loss of an optimized tee were investigated using computational fluid dynamics (CFD) in COMSOL Multiphysics 5.6. The Reynolds-averaged continuity and Navier – Stokes equations were solved with the standard  $k-\epsilon$  turbulence model incorporating wall functions.

**Results.** The value of the pressure loss coefficient of a standard tee showed close agreement with previously published data. The tee construction was optimized with consideration of the vortex zone in the deformation region by rounding the wall, with subsequent numerical investigation.

**Conclusions.** The study demonstrated that rounding the wall in the flow deformation zone of a standard supply-air duct tee reduces hydraulic resistance by 11.9 %. The results contribute to both scientific understanding and practical applications in the development of optimized tee.

**KEYWORDS:** ventilation, energy saving in ventilation, duct tee, pressure loss coefficient, pressure loss reduction, computational fluid dynamics

**Acknowledgements.** The study was supported by the Russian Science Foundation (RSF) grant No. 25-29-01023 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-01023/>) using equipment at the V.G. Shukhov BSTU High Technology Center.

**FOR CITATION:** Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Gaidash D.S., Koverina V.Yu., Iureva S.S. Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):257-268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268 (rus.).

*Corresponding author:* Yulia V. Elistratova, [tgiv.info@mail.ru](mailto:tgiv.info@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Система вентиляции здания обеспечивает подачу и удаление воздуха в помещения для обеспечения требуемых параметров микроклимата. В современном строительстве предпочтение отдается системам вентиляции с механическим побуждением, основными элементами которых являются разветвленная сеть воздуховодов и вентилятор. Однако повышенное энергопотребление механической вентиляции приводит к проблеме энергоэффективности здания за счет увеличения затрат на ее эксплуатацию [1–7].

При проектировании системы вентиляции проводится расчет полных потерь давления, которые складываются из потерь давления на преодоление сопротивления по длине воздуховода и на местные сопротивления. Разветвленная сеть воздуховодов содержит большое количество фасонных элементов, таких как тройники, отводы, крестовины. Фасонные элементы относятся к местным сопротивлениям, которые оказывают большее влияние на потери давления в системе, чем потери давления по длине воздуховода. При расчете потерь давления, возникающих в местных сопротивлениях, используются коэффициенты местных сопротивлений (КМС), они представлены в различных справочных и литературных источниках<sup>1</sup> [8–13].

Одним из направлений снижения гидравлического сопротивления тройника является установка направляющих перегородок. В работе [14] с помощью численного моделирования исследовалось влияние длины и различных положений направляющей перегородки на сопротивление приточного тройника круглого сечения. По результатам исследования удалось снизить сопротивление тройника на 21,5 %. Осуществлялось численное моделирование в двумерной постановке тройника на слияние с верти-

кальной перегородкой [15]. По результатам исследования определено оптимальное соотношение длины перегородки и размера сборного канала тройника, что позволяет снизить расход металла на изготовление по сравнению с конструкцией, приведенной в справочнике [8]. В труде [16] рассматривались различные конструкции приточных тройников с направляющей перегородкой, выполненной по дуге окружности, установленной на боковом ответвлении. Использование такой конструкции дает возможность снизить сопротивление бокового канала тройника в зависимости от его конфигурации от 5,2 до 38,4 %. С помощью численного моделирования исследовались форма, длина и угол наклона направляющей перегородки в приточном тройнике [17]. В зависимости от соотношения расходов воздуха, конструкции и положения направляющей перегородки авторам удалось снизить гидравлическое сопротивление от 4,3 до 263,8 %. С применением численного моделирования изучалась конструкция приточного тройника с направляющей лопаткой на боковом ответвлении, выполненной по дуге окружности, и выступом на проходном участке тройника [18]. Такая конструкция тройника позволила снизить сопротивление на 22,29 % на проход и на 2,4 % на боковом ответвлении.

Другой способ снижения гидравлического сопротивления в фасонных элементах — использование оптимизации и профилирования по очертаниям вихревых зон. В работе [19] проводилось численное и экспериментальное исследование полностью оптимизированного приточного тройника. По результатам исследования получено снижение сопротивления до 165 % на проход и до 118 % в ответвлении при различных соотношениях расходов. Методами численного моделирования в двумерной постановке исследовалась конструкция профилированной вытяжной крестовины, геометрия которой построена по очертаниям вихревых зон, образуемых при срыве потока с острой кромки [20]. Результаты показывают,

<sup>1</sup> ВСН 353–86. Проектирование и применение воздуховодов из унифицированных деталей. М. : Минмонтажспецстрой СССР, 1986. 24 с.

что профилирование позволяет снизить сопротивление фасонного элемента до 45 % на проход и до 60 % на боковом ответвлении. Численное моделирование применялось при изучении конструкции профилированного тройника на слияние в двумерной постановке [21]. По результатам исследования авторам удалось снизить сопротивление тройника примерно в четыре раза по сравнению со стандартным тройником. Выполнялось компьютерное моделирование течения воздуха в симметричном тройнике круглого сечения на слияние в трехмерной постановке [22]. По результатам исследования получено значение коэффициента местного сопротивления тройника. Однако сравнение со справочными сведениями, в частности с данными И.Е. Идельчика, дает расхождение в 34 %.

На основании обзора проведенных исследований видно, что проблема сопротивления фасонных элементов системы вентиляции может привести к серьезным потерям энергии и удорожанию стоимости системы в целом. Кроме этого, из анализа существующих публикаций можно сделать вывод, что на настоящий момент мало научных работ, посвященных изучению снижения сопротивления в симметричных прямоугольных тройниках на разделении потока. Имеется незначительное количество информации о значениях коэффициента местного сопротивления симметричного тройника.

Цель работы — численное исследование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения для определения коэффициента местного сопротивления, установление очер-

таний вихревых зон в месте разделения потока воздуха и коэффициента местного сопротивления оптимизированного приточного тройника, построенного с учетом очертания вихревой зоны в области деформации потока.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование осуществлялось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе (ПК) COMSOL Multiphysics 5.6. Поставленная задача решается в турбулентной стационарной трехмерной постановке. Трехмерная модель стандартного тройника строилась в ПК SolidWorks.

Моделируются стандартный симметричный тройник на разделение потока с размерами входного и выходных участков  $100 \times 100$  мм. Длины входного и выходных участков тройника приняты равными 2,45 м. Длины участков тройника выбирались с учетом обеспечения выравнивания полей скорости и давления в каналах и устранения влияния граничных условий (ГУ) на течение в тройнике.

Первым этапом моделирования является задание ГУ, а также построение расчетной области модели и сетки. В качестве граничных условий задавались условия скорости на входном сечении ГУ<sub>inlet</sub> и избыточного статического давления на выходных сечениях — ГУ<sub>outlet</sub> (рис. 1). Значение скорости принималось 1 м/с, значение избыточного давления — равным нулю. Эквивалентная шероховатость стенок не учитывалась.

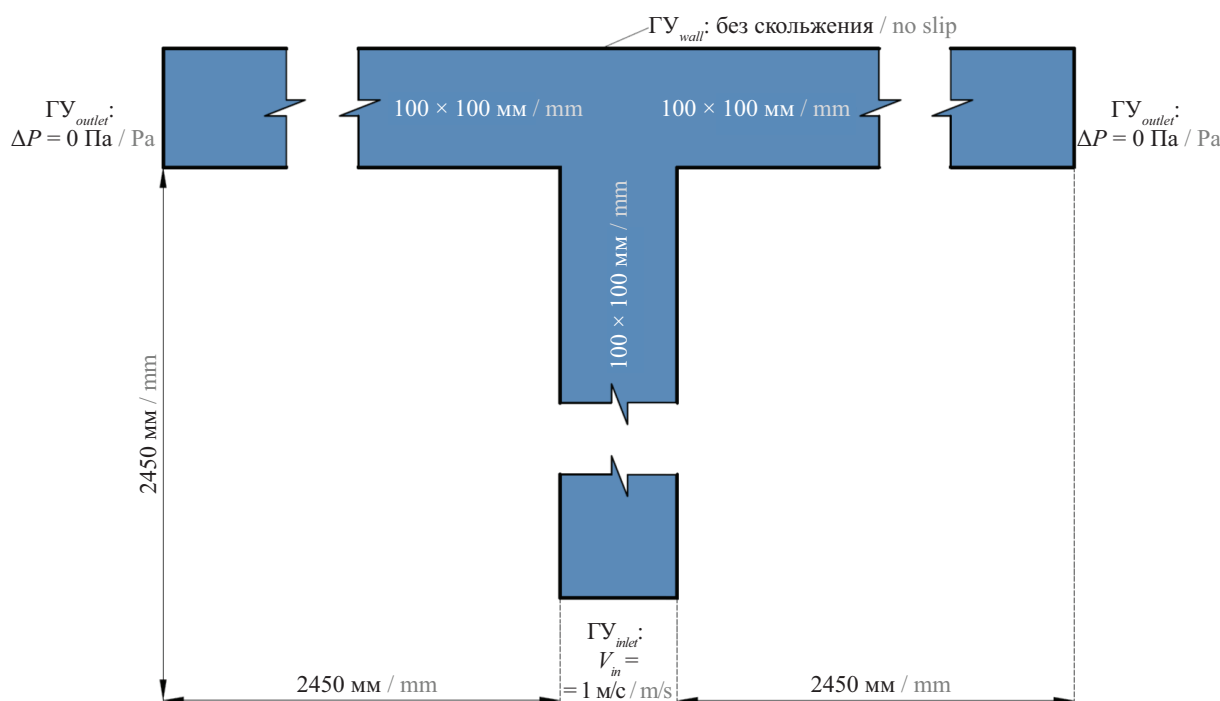


Рис. 1. Область исследования и граничные условия исследуемого тройника

Fig. 1. Research area and boundary conditions of the investigated tee

Табл. 1. Граничные условия исследуемой области тройника

Table 1. Boundary conditions of the investigated tee area

Граничные/начальные условия Boundary/initial conditions	Физический параметр Physical parameter	Значение Value
Граничное условие Inlet Boundary condition Inlet	Скорость на входе Velocity at the inlet	1 м/с m/s
Граничное условие Outlet Boundary condition Outlet	Избыточное статическое давление на выходе Excessive static pressure at the outlet	0 Па Pa
Граничное условие Wall Boundary condition Wall	Без скольжения No slip	–
Начальное условие текучей среды Initial fluid condition	Температура текучей среды Fluid temperature	20 °С

В качестве текучей среды из библиотеки COMSOL Multiphysics 5.6 выбран воздух. Исследование проводилось при температуре текучей среды 20 °С. Плотность и кинематическая вязкость рассчитывались в ПК как функция от температуры текучей среды. Рассчитанные значения в дальнейшем сравнивались с табличными величинами. Задаваемые ГУ представлены в табл. 1.

Для замыкания уравнений неразрывности и Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, используется «стандартная»  $k-\epsilon$  модель турбулентности с пристеночными функциями.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выбора подходящей расчетной сетки выполнялся анализ на сеточную независимость, целью которого является определение размера расчетной сетки, не оказывающей существенного влияния на изменение результата. В данном исследовании используется неструктурированная расчетная сетка. Элементы сетки представляют собой тетраэдры.

Среднее качество сетки при изменении уровня меняется от 0,59 до 0,69.

На рис. 2 показан результат численного исследования на сеточную независимость коэффициента местного сопротивления при различной настройке сетки.

В табл. 2 приведен результат исследования на сеточную независимость при различном уровне настройки расчетной сетки и числе расчетных ячеек сетки. При увеличении числа расчетных ячеек начиная с 6-го уровня сетки наблюдается отсутствие влияния на значение коэффициента местного сопротивления  $\zeta_c$ .

На рис. 3 показано распределение скорости при различном уровне настройки сетки. На основании представленных графиков можно сделать вывод, что потери давления в приточном тройнике складываются из потерь на внезапное расширение потока в месте его разделения, деформацию потока в месте контакта со стенкой тройника, поворот потока в боковом ответвлении, внезапное сужение прохода бокового ответвле-

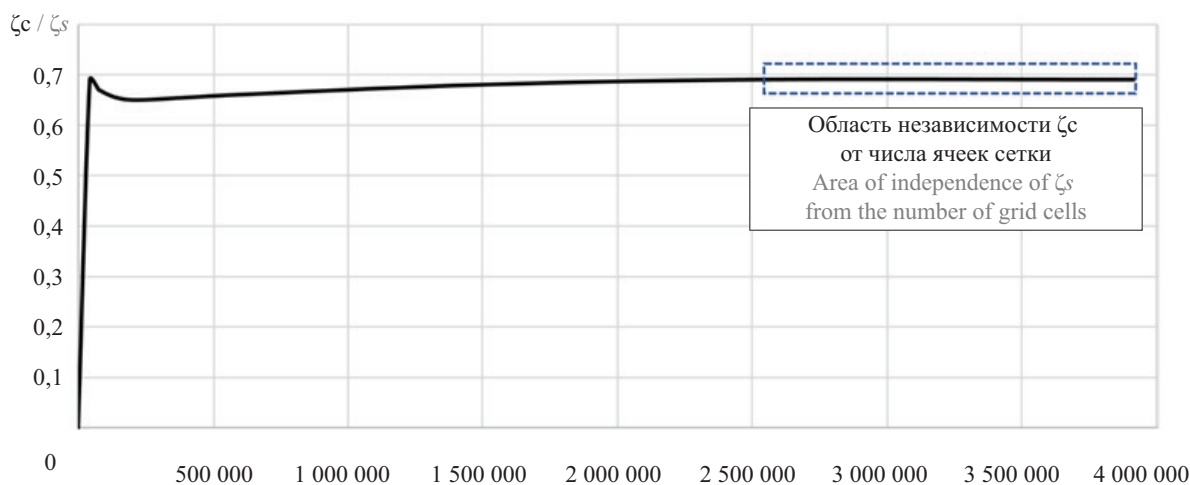


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного сопротивления  $\zeta_c$  от числа ячеек расчетной сетки

Fig. 2. Dependence of the local resistance coefficient  $\zeta_s$  on the number of cells in the computational grid

Табл. 2. Значение коэффициента местного сопротивления при различном уровне настройки расчетной сетки

Table 2. Pressure loss coefficient value at different levels of the calculation grid setting

Настройка сетки Grid level	Число ячеек Number of cells	Значение $\zeta_s$ Value of $\zeta_s$
Уровень сетки 1 Grid level 1	44 075	0,690
Уровень сетки 2 Grid level 2	76 806	0,670
Уровень сетки 3 Grid level 3	194 896	0,650
Уровень сетки 4 Grid level 4	584 360	0,660
Уровень сетки 5 Grid level 5	1 498 627	0,680
Уровень сетки 6 Grid level 6	2 513 660	0,690
Уровень сетки 7 Grid level 7	3 916 704	0,690

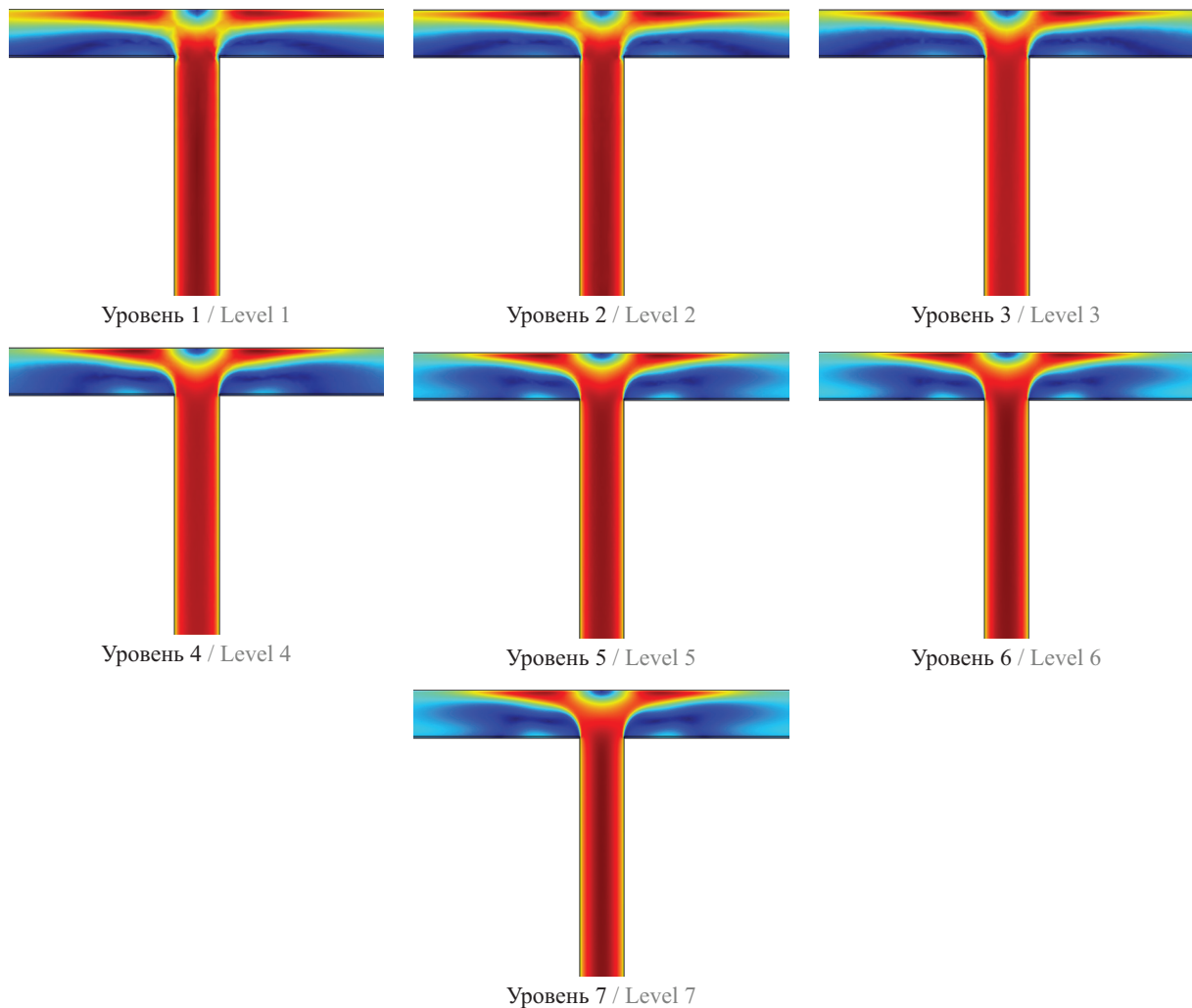


Рис. 3. Распределение скорости при различном уровне настройки расчетной сетки

Fig. 3. Velocity distribution at different levels of mesh configuration

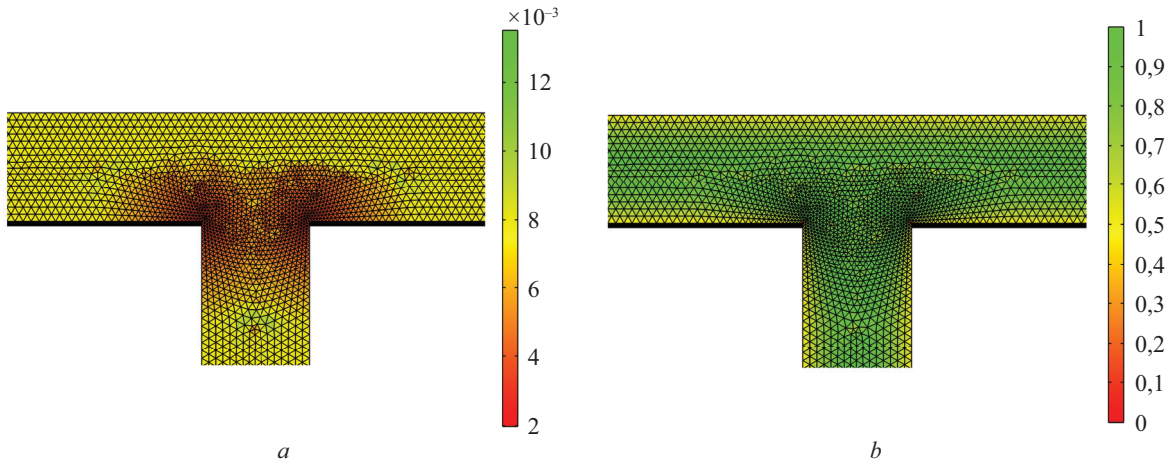


Рис. 4. Размер ячеек (a) и качество ячеек (b) расчетной сетки при исследовании стандартного тройника

Fig. 4. Cell size (a) and cell quality (b) of the computational grid in the study of a standard tee

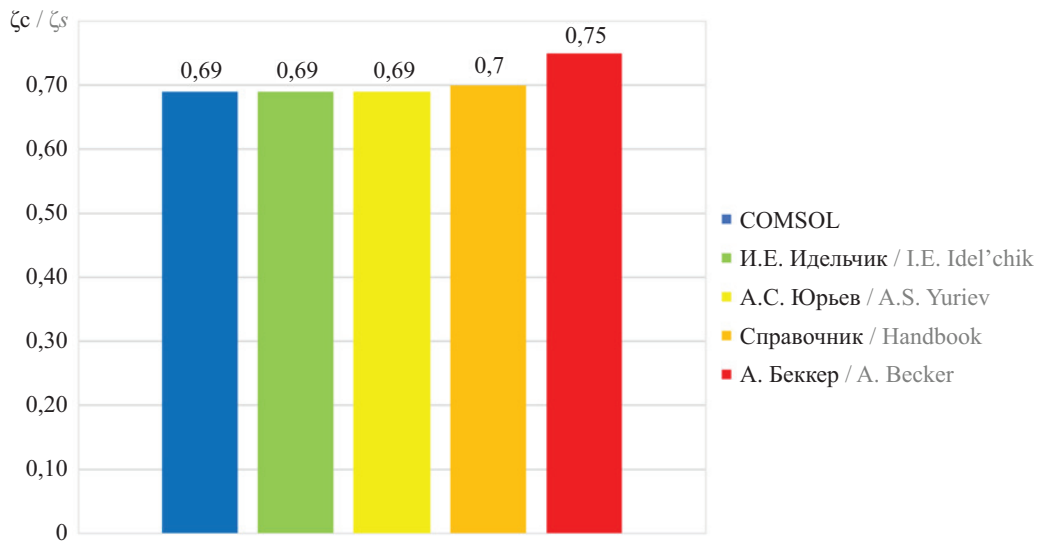


Рис. 5. Сравнение данных численного моделирования со справочными

Fig. 5. Comparison of numerical simulation data with reference data

ния из-за деформации потока, что согласуется с данными [8].

На рис. 4 приведены размер и качество ячеек расчетной сетки, используемой при численном исследовании стандартного тройника, в области разделения потока для принятого в исследовании уровня сетки.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании с известными данными, показывает расхождение менее 1 % с И.Е. Идельчиком [8] и А.С. Юрьевым [9]; 1,45 % со справочником; 8,7 % с А. Беккер [10] (рис. 5).

Для установления значения коэффициента местного сопротивления применялась формула:

$$\zeta_c = \frac{2(\Delta P - \Delta P_{тр}^{вх} - \Delta P_{тр}^{вых})}{\rho_{ж} v_{вх}^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — разность полных давлений во входном и выходных сечениях тройника, Па;  $\Delta P_{тр}^{вх}$  и  $\Delta P_{тр}^{вых}$  —

потери давления на входном и выходных линейных участках тройника, Па, определяемые по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$\Delta P_{тр}^{вх} = \lambda_{вх} \frac{l_{вх}}{d_3} \frac{\rho_{ж} v_{вх}^2}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{тр}^{вых} = \lambda_{вых} \frac{l_{вых}}{d_3} \frac{\rho_{ж} v_{вых}^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{вх}$  и  $\lambda_{вых}$  — коэффициент гидравлического трения входного и выходных участков соответственно;  $l_{вх}$  и  $l_{вых}$  — длина входного и выходных участков соответственно с учетом половины ширины сечения, м;  $d_3$  — эквивалентный диаметр участков, м;  $\rho_{ж}$  — плотность текучей среды при заданной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{вх}$  и  $v_{вых}$  — скорость во входном и выходных сечениях участков соответственно, м/с.

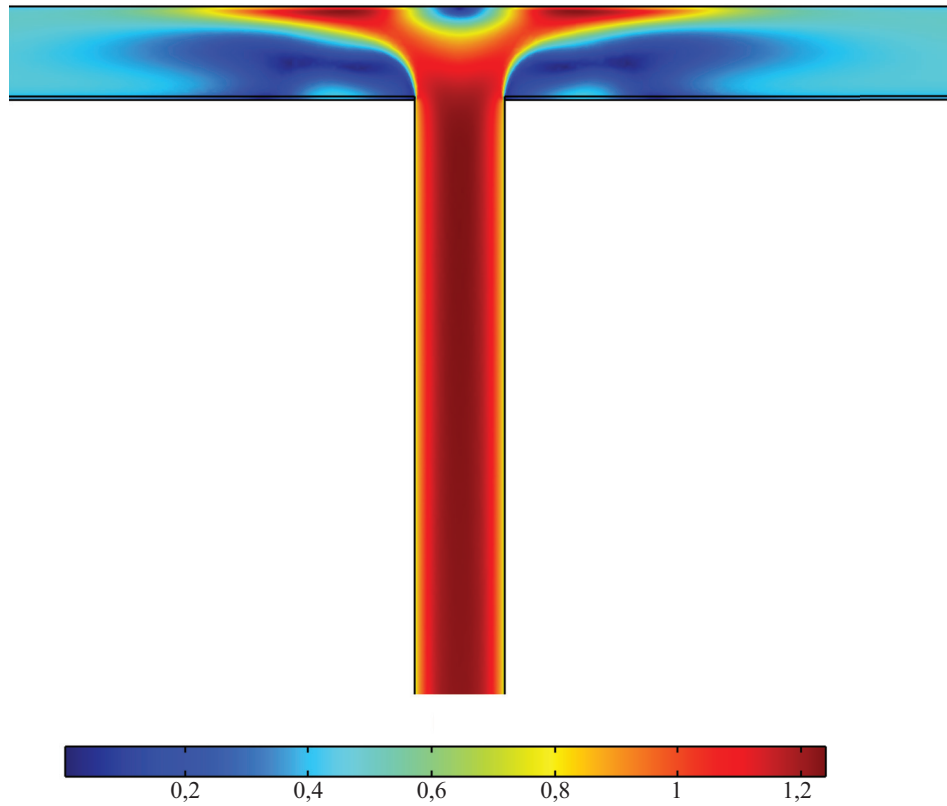


Рис. 6. Распределение скорости в стандартном тройнике

Fig. 6. Velocity distribution in a standard tee

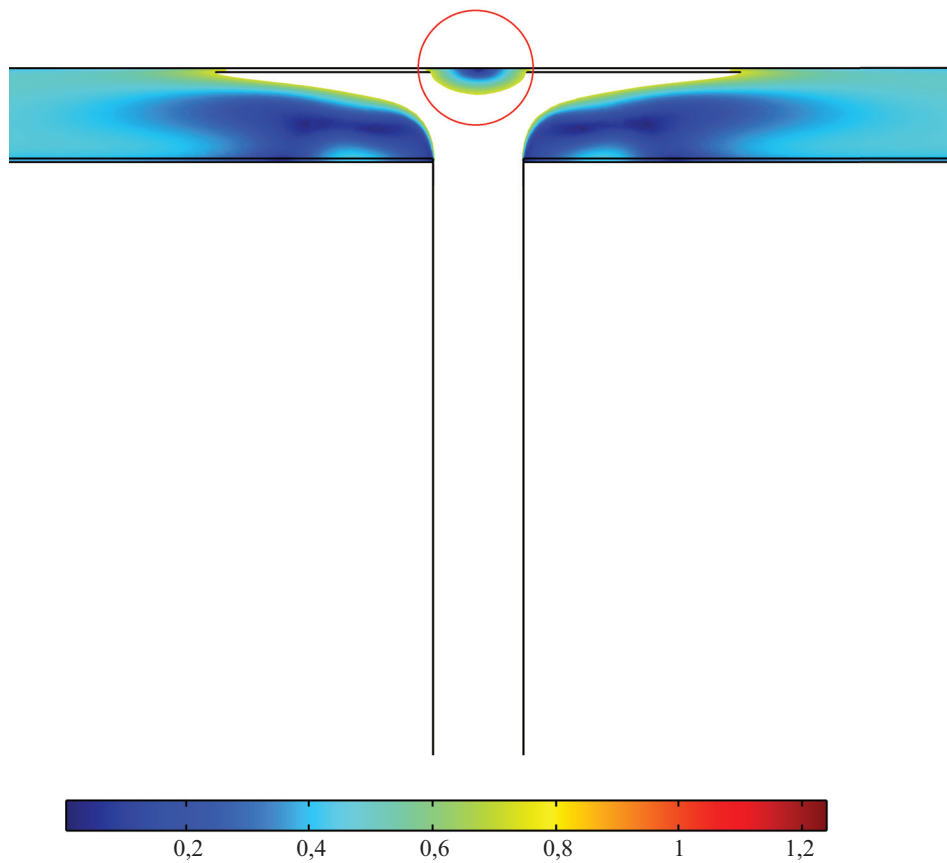


Рис. 7. Распределение скорости в области деформации потока и зоны вихреобразования при отрыве потока с острых кромок

Fig. 7. Velocity distribution in the flow deformation region and vortex formation zones during flow separation from sharp edges

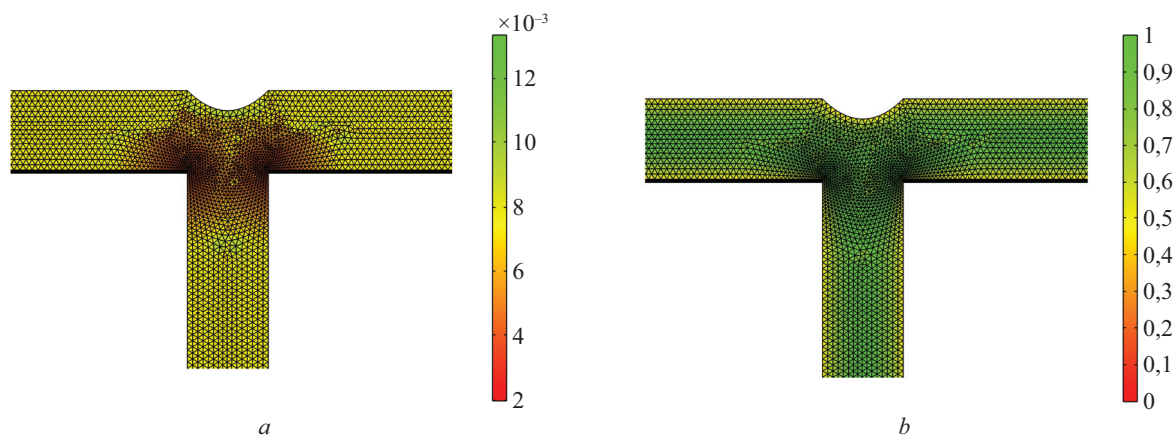


Рис. 8. Размер ячеек (a) и качество ячеек (b) расчетной сетки при исследовании оптимизированного тройника  
 Fig. 8. Cell size (a) and cell quality (b) of the computational grid in the study of an optimized tee

Коэффициент гидравлического сопротивления при отсутствии влияния шероховатости стенок определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{\text{вх}} = \frac{0,316}{\text{Re}_{\text{вх}}^{0,25}}; \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{вых}} = \frac{0,316}{\text{Re}_{\text{вых}}^{0,25}}; \quad (5)$$

где  $\text{Re}_{\text{вх}}$  и  $\text{Re}_{\text{вых}}$  — число Рейнольдса на входном и выходных участках соответственно, рассчитываемое по формуле:

$$\text{Re}_{\text{вх}} = \frac{v_{\text{вх}} d_2}{\nu_{\text{ж}}}; \quad (6)$$

$$\text{Re}_{\text{вых}} = \frac{v_{\text{вых}} d_3}{\nu_{\text{ж}}}; \quad (7)$$

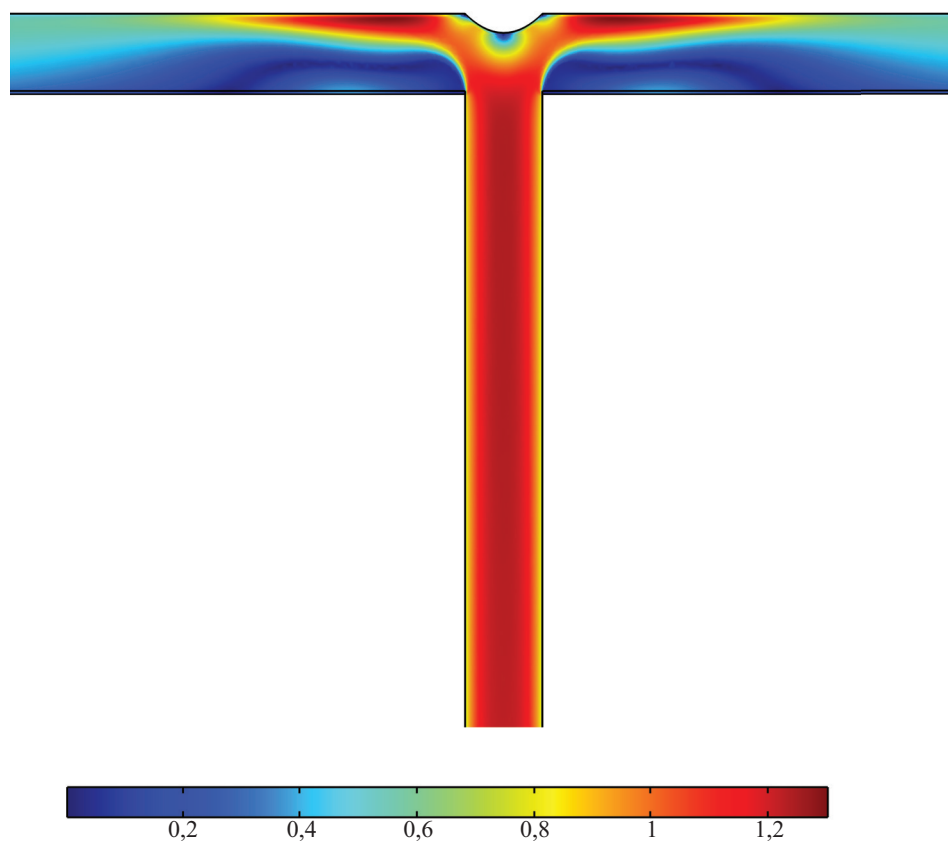


Рис. 9. Распределение скорости в оптимизированном тройнике

Fig. 9. Velocity distribution in an optimized tee

где  $\nu_{ж}$  — кинематическая вязкость жидкости при заданной температуре,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

На рис. 6 показано распределение скорости в продольном сечении на входном и выходных участках стандартного тройника в зоне разделения потока. Попадание потока воздуха из сборного участка воздуховода в зону разделения вызывает его деформацию за счет контакта со стенкой тройника, что приводит к заметному снижению скорости в области контакта и увеличению скорости вокруг данной области.

По результатам численного моделирования стандартного тройника были определены вихревые зоны в местах отрыва потока с острых кромок и область деформации потока при контакте со стенкой воздуховода (рис. 7).

С целью снижения влияния деформации потока на сопротивление тройника выделенная на рис. 7 область оптимизировалась путем скругления конструкции тройника. Ширина и длина оптимизированной поверхности приняты равными 100 мм, а высота — 25 мм. Для оптимизированной конструкции тройника также осуществлялось численное моделирование и исследование на сеточную независимость при тех же граничных условиях.

На рис. 8 показаны размер и качество ячеек расчетной сетки, используемой при численном исследовании оптимизированного тройника, в области разделения потока.

На рис. 9 представлен профиль скорости в продольном сечении на входном и выходных участках оптимизированного тройника в зоне разделения потока воздуха.

В отличие от стандартного тройника оптимизированный тройник снижает деформацию потока за счет обтекания выпуклой поверхности. Однако при этом увеличивается протяженность зоны вихреобразования в месте разделения потока и при его повороте.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании стандартного и оптимизированного тройника, показывает снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено исследование сопротивления стандартного приточного тройника. Распределение поля скорости изучается методом численного моделирования. Достоверность численной модели подтверждается независимостью расчетной сетки и сравнением со справочными данными. Проанализирован эффект снижения сопротивления стандартного тройника за счет геометрической оптимизации его конструкции при заданном значении скорости движения потока. По результатам исследования установлено, что изменение конструкции стандартного приточного тройника путем скругления стенки в области деформации потока позволяет снизить сопротивление на 11,9 %.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Афонин К.В., Жилина Т.С., Загорская А.А., Молостова И.Е. Эффективность систем вентиляции с периодическим режимом работы // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024. № 1 (107). С. 58–67. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-1-58-67. EDN CQXQYT.
2. Карневич В.В., Алескеров Р.М., Грицай М.М. Повышение энергоэффективности эксплуатируемых зданий // *Наукофера*. 2024. № 5–2. С. 251–261. DOI: 10.5281/zenodo.11355211. EDN BUOCOV.
3. Ильина Т.Н., Колесников М.С., Крюков И.В. О комплексных системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях торговых центров // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 4. С. 39–47. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-39-47. EDN AOIIRF.
4. Колесников М.С., Ильина Т.Н. Инновационные способы создания микроклимата в помещениях значительного объема // *Альманах мировой науки*. 2020. № 1 (37). С. 86–89. EDN MZRSBV.
5. Taheri A., Khoshnevis A.B., Lakzian E. The effects of wall curvature and adverse pressure gradient on air ducts in HVAC systems using turbulent entropy generation analysis // *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 113. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014
6. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel J.F., Maestre I.R., Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 626–637. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.280
7. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. Issue 3. Pp. 394–398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. М.О. Штейнберга. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
9. Грачев И.Г., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб. : Мир и семья, 2001. 1154 с.
10. Беккер А. Системы вентиляции; пер. с нем. Л.Н. Казанцевой / под ред. Г.В. Резникова. М. : Техносфера, Евроклимат, 2008. 231 с.
11. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция : уч. для вузов в 2 ч. Ч. 2. Вентиляция. М. : Стройиздат, 1976. 439 с.
12. Каменев П.Н., Тертичник Е.И. Вентиляция : учебник. М. : Издательство АСВ, 2008. 624 с.

13. Краснов Ю.С. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию для производственных и общественных зданий. М. : Термокул, 2006. 288 с.

14. Yin Y., Wen X., Zhang J., Li A. Geometric parameters optimization of low resistance T-junction with guide vanes in HVAC system // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 356. P. 02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056

15. Ziganshin A., Eremina S., Safiullina G., Logachev K. Numerical study of the flow in a symmetrical ventilation junction tee with a baffle vane // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8\_23

16. Gao R., Li H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. Applicability study of a deflector in ventilation and air conditioning duct tees based on an analysis of energy dissipation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019. Vol. 184. Pp. 256–264. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.025

17. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // Building and Environment. 2018. Vol. 132. Pp. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006

18. Misaran M.S., Sing C.F., Adzrie M. Study of Wye-Tee Duck Design at Various Protrusion and Guide Vane Location Using CFD // CFD Letters. 2019. Vol. 11. Issue 11. Pp. 39–47.

19. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S. et al. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee // Building and Environment. 2023. Vol. 244. P. 110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823

20. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Логачев К.И., Кареева Ю.П. Очертания вихревых зон и разработка энергоэффективных крестовин вытяжных вентиляционных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 9 (789). С. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. EDN JEQPOG.

21. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6 (702). С. 41–48. EDN ZGFVWZ.

22. Зиганшин А.М., Еремина С.В. Компьютерное моделирование течения в симметричном вентиляционном тройнике круглого сечения на слияние // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2023. № 1 (2). С. 25–31. EDN HKLXYV.

Поступила в редакцию 18 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 9 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 9 декабря 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Юлия Васильевна Елистратова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tg.v.info@mail.ru;

**Илья Валерьевич Крюков** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 875197, Scopus: 56189577300, Google Scholar: D5NEa4kAAAAJ; iliya.krukov@yandex.ru;

**Дмитрий Сергеевич Гайдаш** — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 1277019; gaidashdmit@yandex.ru;

**Варвара Юрьевна Коверина** — студент; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; v.k.232128@yandex.ru;

**Светлана Сергеевна Юрьева** — студент; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; yurevass22@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Afonin K.V., Zhilina T.S., Zagorskaya A.A., Molostova I.E. Efficiency of ventilation systems with intermittent operation. *Architecture, Construction, Transport*. 2024; 1(107):58-67. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-1-58-67. EDN CQXQYT. (rus.).

2. Karnevich V.V., Aleskerov R.M., Gritsay M.M. The increase in energy efficiency of existing buildings.

*Naukosfera*. 2024; 5-2:251-261. DOI: 10.5281/zenodo.11355211. EDN BUOCOV. (rus.).

3. Pina T.N., Kolesnikov M.S., Kryukov I.V. On integrated heating, ventilation and air conditioning systems in rooms of shopping centers. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(4):39-47. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-39-47. EDN AOIIRF. (rus.).

4. Kolesnikov M.S., Ilina T.N. Innovative ways to create a microclimate in large spaces. *The Almanac of World Science*. 2020; 1(37):86-89. EDN MZRSBV. (rus.).
5. Taheri A., Khoshnevis A.B., Lakzian E. The effects of wall curvature and adverse pressure gradient on air ducts in HVAC systems using turbulent entropy generation analysis. *International Journal of Refrigeration*. 2020; 113:21-30. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014
6. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel J.F., Maestre I.R., Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*. 2022; 8:626-637. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.280
7. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 2008; 40(3):394-398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
8. Idel'chik I.E. *Handbook of hydraulic resistance*. 3rd revise / ed. Shtejnberg M.O. Moscow, Mashinostroenie, 1992; 672. (rus.).
9. Grachev I.G., Pirogov S.Yu., Savishchenko N.P., Yuriev A.S. *Handbook on Calculations of Hydraulic and Ventilation Systems*. St. Petersburg, Mir i Sem'ya, 2001; 1154. (rus.)
10. Becker A. *Ventilation Systems*; translated from German by L.N. Kazantseva / ed. by G.V. Reznikov. Moscow, Tekhnosfera, Evroklimat, 2008; 231. (rus.).
11. Bogoslovsky V.N. *Heating and Ventilation : textbook for Universities in 2 Parts. Part 2. Ventilation*. Moscow, Stroyizdat, 1976; 439. (rus.).
12. Kamenev P.N., Tertichnik E.I. *Ventilation : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 624. (rus.).
13. Krasnov Yu.S. Ventilation and air conditioning systems. *Design recommendations for industrial and public buildings*. Moscow, Thermocool, 2006; 288. (rus.).
14. Yin Y., Wen X., Zhang J., Li A. Geometric parameters optimization of low resistance T-junction with guide vanes in HVAC system. *E3S Web of Conferences*. 2022; 356:02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056
15. Ziganshin A., Eremina S., Safiullina G., Logachev K. Numerical study of the flow in a symmetrical ventilation junction tee with a baffle vane. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 213-222. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8\_23
16. Gao R., Li H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. Applicability study of a deflector in ventilation and air conditioning duct tees based on an analysis of energy dissipation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019; 184:256-264. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.025
17. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct. *Building and Environment*. 2018; 132:345-356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006
18. Misaran M.S., Sing C.F., Adzrie M. Study of Wyee-Tee Duck Design at Various Protrusion and Guide Vane Location Using CFD. *CFD Letters*. 2019; 11(11):39-47.
19. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S. et al. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee. *Building and Environment*. 2023; 244:110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823
20. Ziganshin A.M., Karimullin T.L., Logachev K.I., Kareeva Yu.R. Outlines of vortex zones and development of energy-efficient cross junctions of exhaust ventilation systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 9(789):77-87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. EDN JEQPOG. (rus.).
21. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical investigation of flow in profiled ventilation tee at junction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; 6(702):41-48. EDN ZGFVWZ. (rus.).
22. Ziganshin A.M., Eremina S.V. Numerical simulation of flow in a symmetrical round ventilation merging tee. *Construction, Buildings and Structures*. 2023; 1(2):25-31. EDN HKLXYV. (rus.).

Received September 18, 2025.

Adopted in revised form on December 9, 2025.

Approved for publication on December 9, 2025.

**B I O N O T E S :** **Yulia V. Elistratova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tgv.info@mail.ru;

**Iliya V. Kryukov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 875197, Scopus: 56189577300, Google Scholar: D5HEa4kAAAAJ; iliya.kryukov@yandex.ru;

**Dmitrii S. Gaidash** — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1277019; iliya.krukov@yandex.ru;

**Varvara Yu. Koverina** — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; v.k.232128@yandex.ru;

**Svetlana S. Iureva** — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; yurevass22@gmail.com.

*Author contributions: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.009.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.269-279

## Оптимизация функций технического заказчика при вводе объектов в эксплуатацию средствами моделирования бизнес-процессов

Дмитрий Владимирович Топчий, Илья Вячеславович Лавреняк

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности технического заказчика на этапе ввода строительного объекта в эксплуатацию. Предыдущее исследование продемонстрировало возможность применения параметрической нейросетевой модели оценки эффективности, однако остается нерешенной проблема детальной регламентации управленческих процессов и четкого определения функций технического заказчика на различных этапах жизненного цикла. Современные строительные проекты требуют координации множества участников в условиях жестких временных и бюджетных ограничений, что предъявляет высокие требования к качеству управленческих решений, принимаемых техническим заказчиком при подготовке и введении объектов в эксплуатацию. Методология бизнес-анализа и процессного моделирования позволяет преодолеть эту проблему через систематизацию и оптимизацию управленческих процессов, выявление «узких» мест и дублирование функций, обеспечивая своевременное введение объекта в эксплуатацию. В то время как существуют разработки, направленные на структурирование отдельных этапов строительного производства, менее освещенным остается вопрос комплексного описания и оптимизации всего цикла управленческих решений технического заказчика с применением современного инструментария цифровой трансформации.

**Материалы и методы.** Использованы системный анализ, сравнительный анализ, синтез, параметрическое моделирование, метод аналогии.

**Результаты.** Разработана детализированная BPMN-модель процесса (Business Process Model and Notation — стандартизированный графический язык для моделирования бизнес-процессов) принятия управленческих решений с идентификацией ролей участников, точек принятия решений и обратных связей для циклической корректировки показателей. Предложены механизмы интеграции процессной модели с параметрической нейросетевой моделью и возможность подключения BIM-данных для автоматизации.

**Выводы.** Применение методов реинжиниринга BPMN 2.0 систематизирует деятельность технического заказчика, обеспечивает прозрачность процессов, четкое распределение ответственности и возможность регулярной оптимизации через внедрение корректирующих организационных предложений. Использование моделей управления в качестве основы для разработки информационных систем способствует устранению пробелов между процессным проектированием и практической реализацией. Интеграция BPMN-моделей с искусственными нейронными сетями и BIM-системами открывает перспективы полной автоматизации процессов контроля и регламентации в строительстве.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** технический заказчик, ввод объекта в эксплуатацию, жизненный цикл, параметрическая модель, бизнес-процессы строительства, процессный подход, нотация BPMN 2.0

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Топчий Д.В., Лавреняк И.В. Оптимизация функций технического заказчика при вводе объектов в эксплуатацию средствами моделирования бизнес-процессов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 269–279. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.269-279

Автор, ответственный за переписку: Илья Вячеславович Лавреняк, 89636736614@mail.ru.

## Optimization of technical customer functions when commissioning facilities using business process modelling tools

Dmitry V. Topchiy, Ilya V. Lavreniak

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The relevance of the study is due to the need to improve the efficiency of the technical customer at the stage of commissioning a construction project. The previous research demonstrated the possibility of using a parametric neural

network model to assess efficiency, but the problem of detailed regulation of management processes and a clear definition of the functions of the technical customer at various stages of the life cycle (LC) remains unresolved. Modern construction projects require the coordination of multiple participants under strict time and budget constraints, placing high demands on the quality of management decisions made by the technical customer during the preparation and commissioning of the project. Business analysis and process modelling methodologies help overcome this problem by systematizing and optimizing management processes, identifying bottlenecks and duplication of functions, and ensuring the timely commissioning of the project. While there are developments aimed at structuring individual stages of construction production, less attention is paid to the comprehensive description and optimization of the entire cycle of technical customer management decisions using modern digital transformation tools.

**Materials and methods.** System analysis, comparative analysis, synthesis, parametric modelling, and the analogy method were used.

**Results.** A detailed BPMN model of the management decision-making process was developed, identifying participant roles, decision points, and feedback loops for cyclical performance adjustments. Mechanisms for integrating the process model with a parametric neural network model and the ability to connect BIM data for automation were proposed.

**Conclusions.** The use of BPMN 2.0 reengineering methods systematizes the technical client's activities, ensures process transparency, clear assignment of responsibilities, and the ability to regularly optimize through the implementation of corrective organizational proposals. Using management models as a basis for developing information systems helps bridge the gaps between process design and practical implementation. The integration of BPMN models with artificial neural networks and BIM systems opens up the prospect of fully automating control and regulatory processes in construction.

**KEYWORDS:** technical customer, facility commissioning, life cycle, parametric model, construction business processes, process approach, BPMN 2.0 notation

**FOR CITATION:** Topchiy D.V., Lavreniak I.V. Optimization of technical customer functions when commissioning facilities using business process modelling tools. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2): 269-279. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.269-279 (rus.).

*Corresponding author:* Ilya V. Lavreniak, 89636736614@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование опирается на теоретические аспекты процессного подхода, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000–2015<sup>1</sup> «процесс» определяется как «совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, использующих входы для получения намеченного результата». Данный стандарт, наряду с ГОСТ Р ИСО 9001–2015<sup>2</sup>, устанавливающим требования к системам менеджмента качества, формирует фундаментальную основу для моделирования. Суть процессного подхода: понимание и менеджмент взаимосвязанных процессов как системы способствуют результативности и эффективности организации в достижении намеченных результатов.

Для формализации и детального описания управленческих процессов современные исследования рекомендуют использовать нотацию BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation — стандартизированная графическая нотация для моделирования бизнес-процессов), которая обеспечивает как визуализацию, так и возможность создания исполнимых моделей процессов [1–3].

Проблематика регламентации деятельности технического заказчика активно прорабатывается в современных работах. Так, в публикации Т.К. Кузьминой, П.В. Большаковой, Д.Д. Зуевой [4] предложена организационно-управленческая модель прохождения про-

цедур на этапах предпроектной и проектной подготовки, нацеленная на определение их продолжительности и увязки во времени. Последующие труды Т.К. Кузьминой и соавт. [5] демонстрируют применение нотации BPMN для детального моделирования взаимодействия участников и расчета сроков подготовительных процедур, в частности, для капитального ремонта.

Однако указанные исследования ориентированы на структурирование и расчет плановой продолжительности процессов, менее изученным остается вопрос интеграции формализованных BPMN-моделей с предиктивными инструментами (такими как искусственные нейронные сети (ИНС)) для оперативной оценки эффективности деятельности технического заказчика и выработки управленческих решений в режиме реального времени. Данная работа направлена на восполнение именно этого научно-практического пробела, связывая процессную модель с механизмом поддержки принятия решений для обеспечения своевременного ввода объекта в эксплуатацию.

Необходимо подчеркнуть, что в то время, как многие исследования фокусируются на применении BPMN для отдельных строительных операций или потоков данных BIM, передовой международной практикой демонстрируется его эффективность в моделировании высокоуровневых стратегических и управленческих процессов [6–9]. Так, в публикации О. Heidenwolf и соавт. нотация BPMN 2.0 применяется для детального описания и анализа всего пути цифровой трансформации строительной организации и оценки ее цифровой зрелости [10]. Это подтверждает валидность подхода авторов настоящего исследования к использованию BPMN для моделирования не физического процесса, а именно процесса принятия управленческих решений техническим заказчиком.

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь : введ. 01.11.2015. М. : Стандартиформ, 2015. 45 с.

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования : введ. 01.11.2015. М. : Стандартиформ, 2015. 32 с.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведение анализа и оптимизации бизнес-процессов в строительной компании требует тщательного моделирования, позволяющего выявить «узкие» места, избыточность процедур и их дублирование [11, 12]. Основываясь на этом подходе в исследовании, была применена нотация BPMN 2.0, поскольку она обеспечивает высокую степень детализации потоков работ, четкое распределение ответственности между участниками («пулы» и «дорожки») и возможность определения точек принятия решений. Этот метод моделирования является основой для последующего реинжиниринга процессов, направленного на повышение их эффективности.

Внедрение цифровых инструментов — не самоцель, а современный инструмент управления бизнес-процессами [13]. Как подчеркивают М.В. Высочкина, Н.А. Фокина, компании, стремящиеся поддерживать конкурентоспособность, должны внедрять «цифровые инструменты управления бизнес-процессами». Это полностью соответствует цели настоящего исследования, где нотация BPMN используется для формализации процесса, а нейросетевая модель — в качестве цифрового инструмента его оценки [14].

Ценность применения BPMN подтверждается и другими работами [15], в которых нотации используются для моделирования процессов инспекционного контроля. Отмечается, что BPMN-модели могут быть настроены таким образом, чтобы они наполняли центральную модель (или базу данных) информацией, генерируемой в ходе процесса. Этот принцип обратной связи перекликается с задачей данной статьи, где BPMN-модель процесса служит основой для ввода данных в параметрическую нейросетевую модель.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В предыдущих публикациях были рассмотрены аспекты распределения ключевых функций технического заказчика по различным этапам жизненного цикла (ЖЦ), а также принципы выбора экспертной группы для оценки этих функций [16, 17]. Указанные результаты положены в основу разработки параметрической нейросетевой модели, предназначенной для обеспечения своевременного ввода объектов в эксплуатацию, как инструментария содействия лицам, ответственным за выработку управленческих решений.

Для подготовки к успешному внедрению этой модели, интеграции в практику использования техническими заказчиками требуется детальный операционный регламент, необходимо разработать и обосновать детализированный бизнес-процесс применения данной параметрической модели, описанный в нотации BPMN 2.0.

Растет число статей по внедрению процессного подхода в строительной сфере, отмечается его роль в повышении эффективности операционной деятельности предприятий строительной отрасли [18], сквозном управлении производственными операциями взаимодействующими подразделениями предприятия, что особенно актуально для процессов подготовки к вводу в эксплуатацию и передаче на баланс, охватывающих все стадии ЖЦ строительства объекта. Внедрение комплексных показателей управления бизнес-процессами позволит оценить достижение поставленных целей по каждому ключевому бизнес-процессу [19].

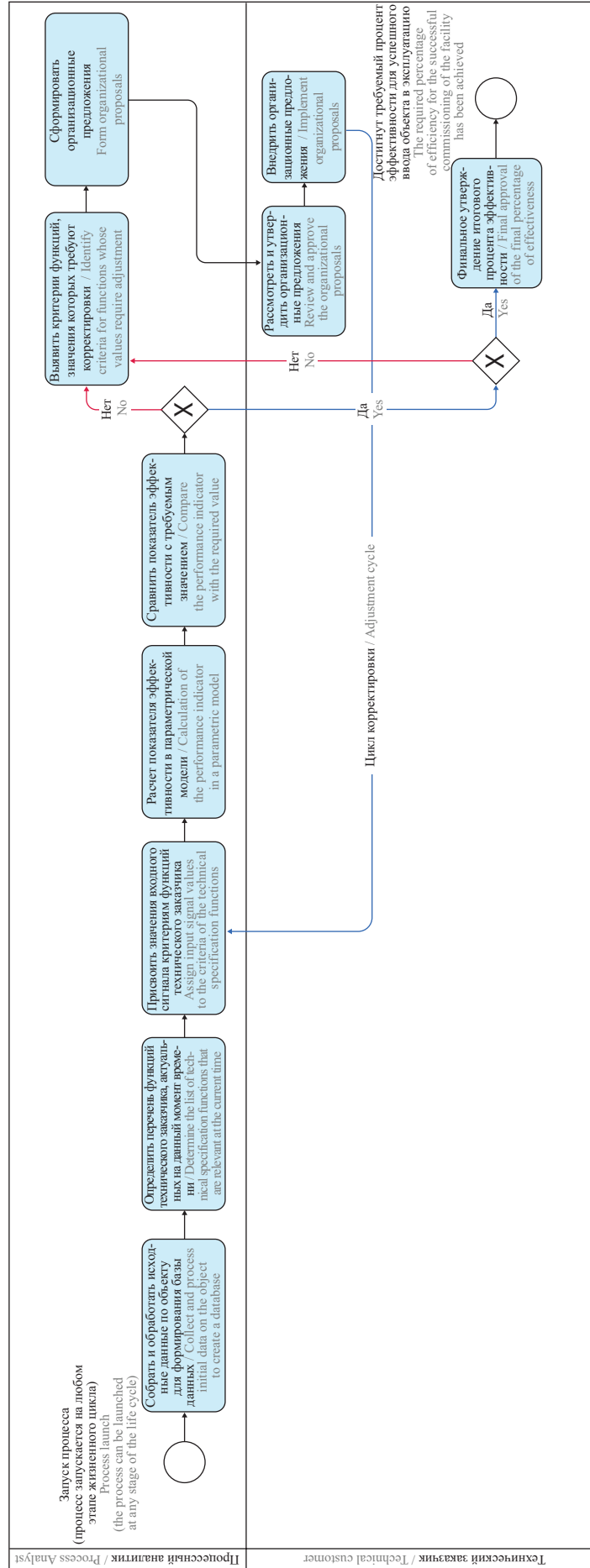
Формализация и реинжиниринг бизнес-процессов служат фундаментом для внедрения цифровых инструментов, подобных разработанной нейросетевой модели [15]. При этом реинжиниринг бизнес-процессов рассматривается не как технология разовой перестройки, а как технология регулярного управления и совершенствования бизнес-процессов [20]. Авторы при выделении основных процессов управления и организации работ на строительной площадке, при оптимизации которых целесообразно применить реинжиниринг, отмечают в том числе комплекс действий по введению объектов в эксплуатацию [21].

Указывается на необходимость проведения реализации процессного подхода в нотации BPMN для получения более качественных BIM-моделей, ускорения сборки и обновления данных в комплексных моделях, упрощения визуализации и корректной имитации реальных управленческих процессов, в целом сокращения ресурсных издержек организациями, осуществляющими BIM-моделирование [22].

В ракурсе BIM-технологий как объектно-ориентированной модели строительного объекта нотация BPMN 2.0 дает возможность визуализировать процесс взаимодействия ролей участников проектной деятельности в строительстве, повысить качество существующих регламентов и стандартов на основе электронной модели бизнес-процессов [23]. При исследовании спектра инструментов, программных комплексов, которые помогают организовать работу на отдельных этапах, в том числе сдачу объекта заказчику, передачу в эксплуатацию, отмечается, что в России только намечается тренд на классификацию и распределение ролей [24].

Общую структуру работы с техническим заказчиком при использовании параметрической модели можно проиллюстрировать следующим образом (рис.).

Эта модель четко разделяет роли технического заказчика как лица, принимающего решения, и роли процессного аналитика как оператора параметрической модели. Достижение требуемого уровня эффективности для обеспечения своевременного ввода объекта в эксплуатацию происходит путем внедре-



Модель взаимодействия участников процесса оценки эффективности технического заказчика для своевременного ввода в эксплуатацию с использованием VRMN-нотации

Model of interaction between participants in the process of assessing the technical customer's performance for timely commissioning using VRMN notation

Процесс принятия управленческих решений по оптимизации функций технического заказчика для своевременного ввода объекта строительства в эксплуатацию  
The process of making management decisions to optimize the functions of the technical customer for the timely commissioning of the construction project

Участник Participant		Роль в процессе Role in the process	
Технический заказчик Technical customer		Владелец процесса. Отвечает за утверждение исходных данных, принятие решения о необходимых ОП и окончательное согласование требуемого процента эффективности Process Owner. Responsible for approving initial data, deciding on necessary organizational proposals, and finalizing the required efficiency percentage	
Процесный аналитик Process Analyst		Отвечает за сбор данных, расчет эффективности и подбор корректирующих ОП Responsible for collecting data, calculating efficiency and selecting corrective organizational proposals	
Параметрическая модель Parametric model		Автоматизированный инструмент на основе ИНС для расчета процента эффективности технического заказчика An automated tool based on ANN for calculating the percentage of technical customer efficiency	
Номер подпункта Item Number	Участник Participant	Действие Action	Описание Description
Начальное событие Initial Event	–	–	Процесс запускается в любой момент времени на одном из этапов ЖЦ The process is launched at any point in time at one of the stages of the life cycle
1	Процесный аналитик Process Analyst	Сбор и обработка исходных данных по объекту строительства Collection and processing of initial data on a construction project	Сбор исходных данных для формирования базы данных Collection of initial data for database formation
2	Процесный аналитик Process Analyst	Определение перечня функций технического заказчика, актуальных на данный момент времени Determining the list of technical specification functions that are relevant at the current time	Формирование перечня функций происходит исходя из анализа характерных параметров объекта строительства в данный момент времени. Неактивные функции не влияют на итоговое требование к проценту эффективности The list of functions is compiled based on an analysis of the construction site's characteristic parameters at a given point in time. Inactive functions do not affect the final efficiency percentage requirement
3	Процесный аналитик Process Analyst	Присвоение значений входного сигнала критериям Assigning input signal values to criteria	Каждый критерий получает значение: 1 — выполнено в полном объеме; 0 — выполнено в неполном объеме/формально; –1 — не выполнено/отсутствует Each criterion receives a value: 1 — fully implemented; 0 — partially implemented/formally; –1 — not implemented/absent
4	Параметрическая модель Parametric model	Расчет показателя эффективности Calculation of the performance indicator	Модель рассчитывает постсинаптический потенциал и суммарный показатель эффективности на основе входных данных и весовых показателей на базе принципов действия ИНС The model calculates the postsynaptic potential and the total efficiency index based on the input data and weighting indicators based on the principles of operation of the ANN

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Участник Participant		Роль в процессе Role in the process
5	Процессный аналитик Process Analyst	Сравнение полученного значения с минимальным необходимым порогом, который определен на основе статистических данных применения параметрической модели на различных объектах строительства Comparison of the obtained value with the minimum required threshold, which is determined on the basis of statistical data from the application of the parametric model at various construction sites
Эксклюзивный шлюз — логический оператор, исключающий “или/или” (выбирается только один путь процесса) Exclusive Gateway — Exclusive Boolean Operator OR	—	Точка принятия решения (ДА или НЕТ) Decision point (YES or NO)
6.1. НЕТ NO	Процессный аналитик Process Analyst	Выявление критериев функций значения, которые требуют корректировки Identification of criteria for functions whose values require adjustment
6.1.1	Процессный аналитик Process Analyst	Определяются значения критериев с показателями 0; –1 (требующие корректировки) The values of criteria with indicators 0; –1 (requiring adjustment) are determined
6.1.2	Технический заказчик Technical customer	Аналитик определяет перечень специфических ОП, которые необходимо внедрить, чтобы повысить значения критериев от –1 до 0 и от 0 до 1 The analyst identifies a list of specific organizational proposals that need to be implemented to increase the criteria values from –1 to 0 and from 0 to 1
6.1.3	Технический заказчик Technical customer	Технический заказчик рассматривает предложенные ОП и принимает решение об их внедрении The technical customer reviews the proposed organizational proposals and makes a decision on their implementation
Поток Flow	—	Фактическая реализация организационных мер Actual implementation of organizational measures
6.2. ДА YES	Процессный аналитик Process Analyst	Поток возвращается к шагу 3 для повторного присвоения входных значений и пересчета. Цикл повторяется до достижения минимального требуемого уровня (шаг 5) The flow returns to step 3 to reassign the input values and recalculate. The cycle repeats until the minimum required level is reached (step 5)
		Минимальная требуемая эффективность достигнута The minimum required efficiency has been achieved

Окончание табл. / End of the Table

Участник Participant			Роль в процессе Role in the process
<p>Эксклюзивный шлюз — логический оператор, включающий “или/или” (выбирается только один путь процесса) Exclusive Gateway — Operator OR</p>	<p>—</p>	<p>Согласован итоговый процент эффективности? Has the final efficiency percentage been agreed upon?</p>	<p>Точка принятия решения (ДА или НЕТ) Decision point (YES or NO)</p>
<p>7.1. НЕТ NO</p>	<p>—</p>	<p>Цикл корректировки Adjustment cycle</p>	<p>Поток возвращается к шагу 6.1 для дополнительного определения значений критериев с показателями 0; –1 The flow returns to step 6.1 to further determine the values of criteria with indicators 0; –1</p>
<p>7.2. ДА YES</p>	<p>Технический заказчик Technical customer</p>	<p>Финальное утверждение итогового процента эффективности Final approval of the final percentage of effectiveness</p>	<p>Объект строительства соответствует требованиям к проценту эффективности технического заказчика для успешного ввода объекта в эксплуатацию The construction project meets the technical customer's performance percentage requirements for successful commissioning of the project</p>
<p>Конечное событие The final event</p>	<p>—</p>	<p>Достигнут требуемый процент эффективности технического заказчика для успешного ввода объекта в эксплуатацию The required percentage of efficiency of the technical specifications for the successful commissioning of the facility has been achieved</p>	<p>Процесс завершен The process is complete</p>

ния корректирующих организационных предложений (ОП) [25].

Участников процесса и последовательность шагов можно представить в таблице.

Определен ключевой контур управления, состоящий из семи шагов, центральным элементом которого является цикл корректировки. В этом цикле аналитик выявляет проблемные критерии (с оценкой 0; -1) и формирует ОП, которые утверждаются техническим заказчиком для последующего внедрения и пересчета. Использование таких инструментов (подобных предиктивной аналитике) обеспечивает проактивный подход к принятию управленческих решений.

Предложенная в настоящей статье методология, связывающая процессный подход (BPMN) с инструментом оценки (ИНС), создает основу для дальнейшей интеграции с информационными моделями зданий (BIM). Актуальность такой интеграции подтверждается международными исследованиями, направленными на решение проблем совместимости данных.

Так, Н. Al-Siah и А. Fioravanti предлагают методологию, где BPMN-модель процесса напрямую

подключается к BIM-модели через центральную облачную базу данных, что позволяет автоматизировать сбор сведений и преодолеть барьеры взаимодействия [26].

Более того, применение BPMN для анализа и оптимизации потоков данных BIM на протяжении всего ЖЦ объекта служит ключом к достижению бесшовной единой комплексной модели [27].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании предложен детализированный бизнес-процесс применения параметрической нейросетевой модели с целью своевременного ввода объекта, описанный в нотации BPMN 2.0, для дальнейшей разработки системы контрольных показателей, регламентации бизнес-процессов деятельности технического заказчика.

Внедрение этой бизнес-модели даст возможность выстроить цикл контроля экономической эффективности своевременного ввода объектов в эксплуатацию и передачи на баланс процессного управления в деятельности технического заказчика.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ретин В.В.* Моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN. Часть II. Практикум в BPMS Bizagi Digital Platform. Литрес, 2021. 155 с.
2. *Лучков В.* Бизнес-процессы. Как это работает. Сила линейных алгоритмов. М. : Филинь, 2019. 239 с.
3. *Silver B.* BPMN method and style. Aptos : Cody-Cassidy Press, 2011. 269 p.
4. *Кузьмина Т.К., Большакова П.В., Зуева Д.Д.* Моделирование во времени процедур на этапе подготовки объекта к строительству. Построение базовой организационно-управленческой модели // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5 (77). С. 414–423. EDN UMURSY.
5. *Кузьмина Т.К., Бабушкина Д.Д., Тихомирова В.Ю., Валяев А.И., Сухоруков А.Е.* Моделирование в BPMN и расчет продолжительности подготовительных процедур для проведения капитального ремонта МКД // Строительное производство. 2024. № 4. С. 119–125. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_4\_119. EDN TBUEOO.
6. *Tsay G.S., Staub-French S., Poirier É.* BIM for facilities management: an investigation into the asset information delivery process and the associated challenges // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 19. P. 9542. DOI: 10.3390/app12199542
7. *Syed R.A.B., Agliata R., Mecca I., Mollo L.* Semantic Web Technologies in Construction Facility Management: A Bibliometric Analysis and Future Directions // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 21. P. 3845. DOI: 10.3390/buildings15213845
8. *Abanda F.H., Balu B., Adukpò S.E., Akintola A.* Decoding ISO 19650 Through Process Modelling for Information Management and Stakeholder Communication in BIM // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 3. P. 431. DOI: 10.3390/buildings15030431
9. *Teixeira A.R., Ferreira J.V., Ramos A.L.* Optimization of Business Processes Through BPM Methodology: A Case Study on Data Analysis and Performance Improvement // Information. 2024. Vol. 15. Issue 11. P. 724. DOI: 10.3390/info15110724
10. *Heidenwolf O., Antal K., Szabó I.* Applying BPMN and Ontology to Measure Digital Maturity in Construction 4.0 — A Case Study // Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2025. DOI: 10.24251/hicss.2025.707
11. *Разилов П.П.* Анализ и оптимизация бизнес-процессов в строительной компании, специализирующейся на проектировании и обустройстве зимних садов // Вестник Московской международной академии. 2022. № 2. С. 170–174. EDN GBUQXI.
12. *Fauth J., Bloch T., Soibelman L.* PACE-BP: Process Analysis and Comparative Evaluation of Building Permit Processes in a Global Perspective // Journal of Management in Engineering. 2024. Vol. 40. Issue 5. DOI: 10.1061/jmenea.meeng-5958
13. *Noardo F., Ellul C., Harrie L., Overland I., Shariat M., Ogori K.A. et al.* Opportunities and challenges for GeoBIM in Europe: developing a building permits use-case to raise awareness and examine technical interoperability challenges // Journal of Spatial Science. 2019. Vol. 65. Issue 2. Pp. 209–233. DOI: 10.1080/14498596.2019.1627253

14. *Высочина М.В., Фокина Н.А.* Использование процессного подхода в инвестиционно-строительной деятельности // *Научный вестник: финансы, банки, инвестиции.* 2024. № 3 (68). С. 215–230. DOI: 10.29039/2312-5330-2024-3-215-230. EDN FUSNLW.
15. *Gardini A., Bragadin M.A., Naticchia B., Carbonari A., Corneli A.* BPMN 2.0 Modelling for the Management of the Inspection of Execution Processes in Construction // *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020.* 2020. Pp. 37–41. DOI: 10.3311/ccs2020-073
16. *Топчий Д.В., Токарский А.Я., Лавреняк И.В., Газдаров А.А.* Распределение основных функций технического заказчика по этапам жизненного цикла строительства объекта // *Строительное производство.* 2024. № 1. С. 70–75. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_1\_70. EDN PMOAXY.
17. *Топчий Д.В., Лавреняк И.В.* Этапы выбора экспертной группы для оценки функций технического заказчика при вводе объекта в эксплуатацию // *Строительное производство.* 2024. № 4. С. 112–118. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_4\_112. EDN RMPWKJ.
18. *Кемайкин Н.К., Павленков М.Н., Маева Л.С.* Внедрение процессного подхода в строительной сфере // *Экономика: вчера, сегодня, завтра.* 2022. Т. 12. № 1–1. С. 53–61. DOI: 10.34670/AR.2022.44.92.007. EDN GXAFDJ.
19. *Кулак О.Д.* Совершенствование бизнес-процессов при проектировании и строительстве заводов пищевой промышленности // *Вестник науки.* 2023. Т. 3. № 6 (63). С. 81–93. EDN YWSCLU.
20. *Ложкин Н.Д.* Актуальные вопросы реинжиниринга бизнес-процессов // *Colloquium-Journal.* 2020. № 9–1 (61). С. 9–12. EDN MDGIFA.
21. *Сборщиков С.Б., Маслова Л.А.* Реинжиниринг объектов капитального строительства и реинжиниринг технологических процессов // *Вестник МГСУ.* 2019. Т. 14. № 10. С. 1321–1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330. EDN PVOLNK.
22. *Новикова А.Ю., Кан Е.Н.* Автоматизация процессов обновления данных BIM-моделей объектов капитального строительства // *Экономика. Право. Инновации.* 2024. № 2. С. 72–80. DOI: 10.17586/2713-1874-2024-2-72-80. EDN SYGOWC.
23. *Рзун И.Г., Радин А.Ю., Балухин В.Ю.* BIM-технологии как объектно-ориентированная модель строительного объекта // *Вестник Академии знаний.* 2024. № 2 (61). С. 357–360. EDN RVJRQL.
24. *Копылов А.Д., Королев А.В., Батищев А.В.* Цифровизация процессов управления в строительстве // *Естественно-гуманитарные исследования.* 2023. № 2 (46). С. 370–375. EDN YJEKYJ.
25. *Топчий Д.В., Лавреняк И.В.* Организационные предложения для повышения эффективности процесса выполнения функций технического заказчика при вводе объекта в эксплуатацию // *Строительное производство.* 2025. № 3. С. 27–31. DOI: 10.54950/26585340\_2025\_3\_27. EDN XPBHGG.
26. *Al-Siah H., Fioravanti A.* BIM and BPMN 2.0 integration for interoperability challenge in construction industry // *Technological Imagination in the Green and Digital Transition.* 2023. Pp. 227–235. DOI: 10.1007/978-3-031-29515-7\_21
27. *Cao S., Sun H., Tong Z.* BPMN-Based Building Project Lifecycle Analysis with a Core of BIM // *CAAD Futures 2025 — Catalytic Interfaces Conference Proceedings.* Vol. I. Hong Kong : The University of Hong Kong, 2025. Pp. 375–388.

Поступила в редакцию 29 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 16 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Дмитрий Владимирович Топчий** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; TopchiyDV@mgsu.ru;

**Илья Вячеславович Лавреняк** — аспирант кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 89636736614@mail.ru.

*Вклад авторов:*

*Топчий Д.В. — научное руководство, доработка текста.*

*Лавреняк И.В. — концепция исследования, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Repin V.V. Modeling Business Processes in BPMN Notation. *Part II. Practicum in BPMS Bizagi Digital Platform.* Litres, 2021; 155. (rus.).
2. Luchkov V. Business Processes. How It Works. *The Power of Linear Algorithms.* Moscow, Filin, 2019; 240. (rus.).

3. Silver B. *BPMN method and style*. Aptos, Cody-Cassidy Press, 2011; 269.
4. Kuzmina T.K., Bolshakova P.V., Zueva D.D. Time simulation of procedures at the stage of preparing an object for construction. Building a basic organizational and management model. *Engineering journal of Don*. 2021; 5(77):414-423. EDN UMURSY. (rus.).
5. Kuzmina T.K., Babushkina D.D., Tikhomirova V.Yu., Valyaev A.I., Sukhorukov A.E. Modeling in BPMN and calculation of the duration of preparatory procedures for capital repairs of apartment buildings. *Construction Production*. 2024; 4:119-125. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_4\_119. EDN TBUEOO. (rus.).
6. Tsay G.S., Staub-French S., Poirier É. BIM for facilities management: an investigation into the asset information delivery process and the associated challenges. *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9542. DOI: 10.3390/app12199542
7. Syed R.A.B., Agliata R., Mecca I., Mollo L. Semantic Web Technologies in Construction Facility Management: A Bibliometric Analysis and Future Directions. *Buildings*. 2025; 15(21):3845. DOI: 10.3390/buildings15213845
8. Abanda F.H., Balu B., Adukpó S.E., Akintola A. *Decoding ISO 19650 Through Process Modelling for Information Management and Stakeholder Communication in BIM*. *Buildings*. 2025; 15(3):431. DOI: 10.3390/buildings15030431
9. Teixeira A.R., Ferreira J.V., Ramos A.L. Optimization of Business Processes Through BPM Methodology: A Case Study on Data Analysis and Performance Improvement. *Information*. 2024; 15(11):724. DOI: 10.3390/info15110724
10. Heidenwolf O., Antal K., Szabó I. Applying BPMN and Ontology to Measure Digital Maturity in Construction 4.0 — A Case Study. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. 2025. DOI: 10.24251/hicss.2025.707
11. Razilov R.R. Analysis and optimization of business processes in a construction company specializing in design and arrangement of winter gardens. *Bulletin of the Moscow International Academy*. 2022; 2:170-174. EDN GBUQXI. (rus.).
12. Fauth J., Bloch T., Soibelman L. PACE-BP: Process Analysis and Comparative Evaluation of Building Permit Processes in a Global Perspective. *Journal of Management in Engineering*. 2024; 40(5). DOI: 10.1061/jmenea.meeng-5958
13. Noardo F., Ellul C., Harrie L., Overland I., Shariat M., Ohori K.A. et al. Opportunities and challenges for GeoBIM in Europe: developing a building permits use-case to raise awareness and examine technical interoperability challenges. *Journal of Spatial Science*. 2019; 65(2):209-233. DOI: 10.1080/14498596.2019.1627253
14. Vysochina M.V., Fokina N.A. Using a process approach in investment and construction activities. *Scientific Bulletin: Finance, Banking, Investment*. 2024; 3(68):215-230. DOI: 10.29039/2312-5330-2024-3-215-230. EDN FUSNLW. (rus.).
15. Gardini A., Bragadin M.A., Naticchia B., Carbonari A., Corneli A. BPMN 2.0 Modelling for the Management of the Inspection of Execution Processes in Construction. *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020*. 2020; 37-41. DOI: 10.3311/cc2020-073
16. Topchiy D.V., Tokarskiy A.Ya., Lavrenyak I.V., Gazdarov A.A. Distribution of the main functions of the technical customer by stages of the object construction life cycle. *Construction Production*. 2024; 1:70-75. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_1\_70. EDN PMOAXY. (rus.).
17. Topchiy D.V., Lavrenyak I.V. Stages of selecting an expert group to evaluate the functions of the technical customer when commissioning a facility. *Construction Production*. 2024; 4:112-118. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_4\_112. EDN RMPWKJ. (rus.).
18. Kemaikin N.K., Pavlenkov M.N., Maeva L.S. The implementation of the process approach in the construction sector. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022; 12(1-1):53-61. DOI: 10.34670/AR.2022.44.92.007. EDN GXAFDJ. (rus.).
19. Kulak O.D. Improving business processes in the design and construction of food processing plants. *Science Bulletin*. 2023; 3(6):(63):81-93. EDN YWSCLU. (rus.).
20. Lozhkin N.D. Topical issues of re-engineering business processes. *Colloquium-Journal*. 2020; 9-1(61): 9-12. EDN MDGIFA. (rus.).
21. Sborshikov S.B., Maslova L.A. Reengineering of capital construction objects and reengineering of technological processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1321-1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330. EDN PVOLNK. (rus.).
22. Novikova A.Yu., Kan E.N. Automation of BIM data updating processes-models of capital construction objects. *Economics. Law. Innovations*. 2024; 2:72-80. DOI: 10.17586/2713-1874-2024-2-72-80. EDN SYGOWC. (rus.).
23. Rzun I.G., Radin A.Yu., Balukhin V.Yu. BIM technologies as an object-oriented model of a construction object. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024; 2(61):357-360. EDN RVJRQL. (rus.).
24. Kopylov A.D., Korolev A.V., Batishchev A.V. Digitalization of management processes in construction. *Natural and Humanitarian Studies*. 2023; 2(46):370-375. EDN YJEKYJ. (rus.).
25. Topchiy D.V., Lavrenyak I.V. Organizational proposals to improve the efficiency of the process of performing the functions of a technical customer during the commissioning of a facility. *Construction Production*. 2025; 3:27-31. DOI: 10.54950/26585340\_2025\_3\_27. EDN XPBHGG. (rus.).

26. Al-Siah H., Fioravanti A. BIM and BPMN 2.0 integration for interoperability challenge in construction industry. *Technological Imagination in the Green and Digital Transition*. 2023; 227-235. DOI: 10.1007/978-3-031-29515-7\_21

27. Cao S., Sun H., Tong Z. BPMN-Based Building Project Lifecycle Analysis with a Core of BIM. *CAAD Futures 2025 — Catalytic Interfaces Conference Proceedings. Vol.I*. Hong Kong, The University of Hong Kong, 2025; 375-388.

*Received November 29, 2025.*

*Adopted in revised form on December 8, 2025.*

*Approved for publication on January 16, 2026.*

**BIOTOTES: Dmitry V. Topchiy** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Structure Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; TopchiyDV@mgsu.ru;

**Ilya V. Lavreniak** — postgraduate student of the Department of Structure Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 89636736614@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Dmitry V. Topchiy — scientific supervision, revision of the text.*

*Ilya V. Lavreniak — concept of the study, collection and processing of material, writing of the original text, final conclusions.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Управление жизненным циклом коммунальной инфраструктуры на основе цифрового мастер-планирования

Марина Евгеньевна Дементьева<sup>1</sup>, Анна Сергеевна Малькова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *ПРАЙМКЕЙ; г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Высокий износ объектов коммунальной инфраструктуры обусловлен неэффективным управлением жизненным циклом (ЖЦ), в частности устаревшими подходами к планированию эксплуатационных мероприятий. Исследование направлено на решение проблем существующей на текущий момент разобщенности информационных систем, изолированности эксплуатационного процесса от прочих этапов ЖЦ. Предметом исследования является цифровое мастер-планирование (ЦМП) как инструмент создания единой цифровой платформы (ЕЦП) для поддержки принятия решений на всех этапах ЖЦ коммунальной инфраструктуры. В задачи исследования входили сравнительный анализ систем управления технической эксплуатацией коммунальных сетей, составление перечня ключевых атрибутов, необходимых для создания реестра данных и имеющих первоочередное значение для предикативного планирования эксплуатации.

**Материалы и методы.** Исследование основано на системном анализе актуальных нормативных документов и научных публикаций в области цифровизации эксплуатационных процессов. На основе метода SWOT-анализа проведено комплексное изучение проблем, преимуществ, рисков и перспектив применения ЦМП для основных участников — субъектов этапов ЖЦ объектов коммунальной инфраструктуры. Предложено оценивать эффективность применения ЕЦП на основе метода линейной свертки.

**Результаты.** Разработана система критериев для многокритериальной оценки эффективности использования ЦМП на этапе эксплуатации коммунальной инфраструктуры. Создана блок-схема ЕЦП управления ЖЦ объектов и сформулированы рекомендации по ее внедрению.

**Выводы.** Значимость предложенной схемы ЕЦП заключается в устранении разрыва в системе управления ЖЦ коммунальной инфраструктуры. Предлагаемое решение позволит систематизировать большие потоки данных, поступающих в режиме реального времени, расширит возможности аналитики и прогнозирования технического состояния. В результате ожидается сокращение времени выявления и устранения эксплуатационных нарушений, повышение надежности функционирования коммунальной инфраструктуры, снижение потерь ресурсов и обеспечение их качества.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мастер-план, планово-предупредительные ремонты, предикативная эксплуатация, модернизация коммунальной инфраструктуры, износы, аварии, информационные системы, реестр, атрибуты

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Дементьева М.Е., Малькова А.С. Управление жизненным циклом коммунальной инфраструктуры на основе цифрового мастер-планирования // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 280–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.280-293

Автор, ответственный за переписку: Марина Евгеньевна Дементьева, 7dem@mail.ru.

## Managing the life cycle of municipal infrastructure based on digital master planning

Marina E. Dement'eva<sup>1</sup>, Anna S. Malkova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *PRIMEKEY; Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The high depreciation of public infrastructure facilities is due to inefficient life cycle management, in particular outdated approaches to planning operational activities. This study aims to address the current fragmentation of information systems and the isolation of the operational process from other lifecycle stages. The research focuses on digital master planning as a tool for creating a unified digital platform to support decision-making at all stages of the utility infrastructure lifecycle. The study's objectives included a comparative analysis of utility network maintenance management systems and the compilation of a list of key attributes necessary for creating a data register and crucial for predictive planning.

**Materials and methods.** The study is based on a systematic analysis of current regulatory documents and scientific publications in the field of digitalization of operational processes. Using a SWOT analysis method, a comprehensive study

was conducted of the challenges, benefits, risks, and prospects of applying digital master planning for key stakeholders in the lifecycle stages. The paper proposes evaluating the effectiveness of a unified digital platform using a linear convolution method.

**Results.** A system of criteria for multi-criteria evaluation of the effectiveness of digital master planning during the operational phase of utility infrastructure has been developed. A flowchart for a unified digital platform for asset lifecycle management has been created, and recommendations for its implementation have been formulated.

**Conclusions.** The significance of the proposed unified digital platform lies in its ability to bridge the gap in the lifecycle management system for utility infrastructure. The proposed solution will systematize large streams of real-time data, expanding analytical capabilities and technical condition forecasting. This is expected to reduce the time it takes to identify and resolve operational issues, improve the reliability of utility infrastructure, reduce resource losses, and ensure their quality.

**KEYWORDS:** master plan, scheduled preventive maintenance, predictive operation, modernization of public utility infrastructure, depreciation, accidents, information systems, registry, attributes

**FOR CITATION:** Dement'eva M.E., Malkova A.S. Managing the life cycle of municipal infrastructure based on digital master planning. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):280-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.280-293 (rus.).

*Corresponding author:* Marina E. Dement'eva, 7dem@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Текущая статистика Росстата и аналитических источников свидетельствует о неудовлетворительном состоянии коммунальной инфраструктуры. Так, средняя величина износа коммунальных сетей по стране составляет порядка 40–50 %, достигая в отдельных регионах критических значений 70 % и выше. Ежегодно фиксируются сотни аварий с серьезными последствиями и большими потерями коммунальных ресурсов [1]. Причины такой ситуации в коммунальной сфере кроются, в том числе, в неэффективной системе управления жизненным циклом объектов коммунальной инфраструктуры (ЖЦ ОКИ) вследствие технологического отставания, организационных проблем, человеческого фактора, несовместимости разрабатываемых цифровых инструментов [2].

Сегодня для ОКИ на разных этапах их жизненного цикла используются различные информационные системы, которые созданы как отдельные подсистемы и решения по своим стандартам [3]. Они зачастую фрагментированы, имеют недостаточную интеграцию, проблемы по обмену данными, что приводит к снижению эффективности управления и увеличению затрат [4].

По мнению авторов, наиболее сложный в управлении ЖЦ — этап эксплуатации, поскольку он характеризуется осложненными условиями производства ремонтно-восстановительных работ, высокими рисками отказов элементов ОКИ, рисками нарушений качества коммунальных ресурсов, высокими эксплуатационными затратами и социальными последствиями [5]. Применяемый сейчас традиционный подход к управлению эксплуатационным состоянием на основе системы планово-предупредительных ремонтов устарел, что косвенно подтверждается существенным износом коммунальных сетей [6]. Чтобы оценить состояние какого-либо участка инженерной сети и принять решение, например, о продлении его срока службы, одним из ключевых условий является наличие полной статистики повреждений и выполненных ремонтов с момента ввода этого участка

в эксплуатацию. Однако такие сведения либо отсутствуют, либо доступны лишь за несколько последних лет [7].

Сегодня сбор данных по ОКИ происходит из разных источников, которые никак не сопоставляются, что часто ведет к их несовпадению по одному и тому же объекту [8]. Нередки случаи, когда сведений недостаточно. Например, нет информации не только о сроках и объемах проводимых ранее плановых и аварийных ремонтах, но и о точном размещении инженерных сетей, их характеристиках, применяемых материалах, оборудовании. Такие данные в ограниченном виде часто представлены только в муниципальных схемах ресурсоснабжения, которые также не обеспечивают полноту и актуальность информации. Очевидно, что при отсутствии сведений повышается риск возникновения заброшенных участков коммуникаций, которые становятся источниками массовых аварий [9].

В основе принятия решения по выполнению тех или иных эксплуатационных мероприятий лежит понятие эффективного срока службы, уточняемого по результатам определения технического состояния или износа. При этом различные научные исследования подтверждают неэффективность традиционных методов мониторинга для эксплуатируемых ОКИ из-за высокого риска человеческой ошибки [10, 11], недоступности сетей для непосредственного наблюдения [12], неразвитости средств дистанционного контроля [13], низкой автоматизации процессов [14]. Таким образом, высокий поток отказов, недоучет фактического технического состояния, избыточность или наоборот недостаточность ремонтов, нарушение сроков планового межремонтного периода, повышенные трудоемкости, стоимости и продолжительности ремонтных работ представляют собой следствие громоздкости и инертности системы принятия решения.

Эта проблема обосновывает актуальность создания единой цифровой платформы (ЕЦП) для управления ОКИ. В 2024 г. Минстрой РФ совместно с Минцифры анонсировал начало создания цифрового сервиса для развития ОКИ на перспективу до 2036 г.,

который должен включить как реестр самих ОКИ, так и фактические сведения об их эксплуатационном состоянии. Предполагается, что такой сервис позволит улучшить контроль технического состояния ОКИ, качества коммунальных услуг, повысить эффективность управления коммунальными ресурсами, оптимизировать инвестиционные программы по модернизации ОКИ с учетом современных требований к комплексному развитию территорий агломераций (КРТ). Создание цифрового сервиса предполагает использование инструментов автоматизации и существующих информационных систем, а также разработку единых цифровых моделей и стандартов данных. Эта новая актуальная задача пока еще недостаточно освещена в научных работах и перспективна для научно-практических исследований.

По мнению авторов, на текущий момент наблюдается разрыв в системе управления жизненным циклом. И если планирование КРТ уже имеет отдельные «цифровые» связи с процессами проектирования и строительства ОКИ, то эксплуатационный процесс фактически изолирован. Поэтому необходима полная интеграция, которая возможна на основе единой базы как тематических, так и пространственных данных. Она даст возможность анализировать большие объемы информации и в конечном итоге организовать единую систему управления непрерывным ЖЦ ОКИ.

В настоящее время системы управления в строительной отрасли представляют собой статичные цифровые документы [15]. Обмен данными может происходить с большим количеством информационных систем федерального, регионального, локального уровней: ГИС ОГД, ФГИС ТП, ЕГРН, ГИС ЕГРЗ, НСПД, ИСУП, ЕИСЖС, Росреестр, АИС ЦД. Также можно отметить, что для ОКИ используются свои региональные и отраслевые информационные системы, геоинформационные системы коммунальных сетей. В каждой системе коммунальной инфраструктуры, будь то энергетический комплекс, теплоэнергетическое или водопроводно-канализационное хозяйство, газовая отрасль, применяются внутренние автоматизированные системы управления и диспетчеризации, АСУПР [16]. Для эксплуатации объектов жилищного хозяйства, которые связаны с ОКИ через поставляемые коммунальные ресурсы, существует своя информационная система ГИС ЖКХ [17]. Для управления городским хозяйством используется ЕДС ЖКХ [18]. И это не исчерпывающий перечень информационных систем. При работе с ними фиксируются несовпадения, ошибки, которые имеют тенденцию к накоплению [19].

Следовательно, повышение степени государственной зрелости управления ЖЦ ОКИ и переход к современной системе планирования их эксплуатации возможны путем создания единой цифровой платформы (ЕЦП), обеспечивающей бесшовный обмен данными, в том числе в режиме реального вре-

мени. В основе такой платформы должен лежать инструмент, позволяющий достичь целевых показателей различных федеральных проектов. Сейчас, например, инструментом реализации федерального проекта «Модернизация коммунальной инфраструктуры» являются комплексные планы модернизации, формируемые в информационной системе Фонда развития территорий. Вместе с тем этап последующей эксплуатации модернизированных объектов опять не включен в единый управленческий процесс. Поэтому по гипотезе авторов формирование единого информационного пространства, где могли бы не только разрабатываться планы модернизации ОКИ, но и аккумулироваться сведения об их текущем состоянии, прогнозах изменения нагрузок, возможных рисках, позволяющие корректировать как долгосрочные цели развития территории, так и оперативно реагировать на возникающие текущие проблемы нарушений качества коммунальных ресурсов и услуг, может быть реализовано на основе цифрового мастер-планирования (ЦМП).

Первые мастер-планы в России появились в начале 2000-х гг. Они представляли собой новый формат комплексного стратегического планирования развития территорий, направленного на повышение качества жизни [20]. Сейчас мастер-планирование применяется для КРТ различных общественных пространств, функциональных кластеров, городов в целом. На текущий момент под мастер-планом понимается чаще всего пока один инструмент многоуровневого подхода к градостроительному планированию в виде цифровых документов, созданный для объединения градостроительной документации, синхронизации данных о городской инфраструктуре, формирования интерактивных виртуальных моделей. Однако в марте 2024 г. было издано Постановление Правительства Москвы № 438-ПП, согласно которому утверждено «Положение о цифровом мастер-планировании территории города Москвы». По определению этого нормативного акта ЦМП представляет собой не просто комплексный проект развития городов и агломераций, а «процесс сбора, анализа, подготовки и обработки информации, необходимой для принятия решений, направленных на развитие городской инфраструктуры». В таком определении ЦМП отождествляет собой цифровую информационную модель и предусматривает не только переход от документов бумажного формата к цифровым форматам, но и управление КРТ на основе больших данных, цифровых методов и технологий [21].

ЦМП как инструмент в системе управления развитием территории, и в частности модернизации ОКИ, по мнению авторов, имеет ряд возможностей, позволяющих перейти от традиционной системы плано-предупредительной эксплуатации к системе предикативной эксплуатации, основанной на аналитике информации, моделировании и прогнозировании

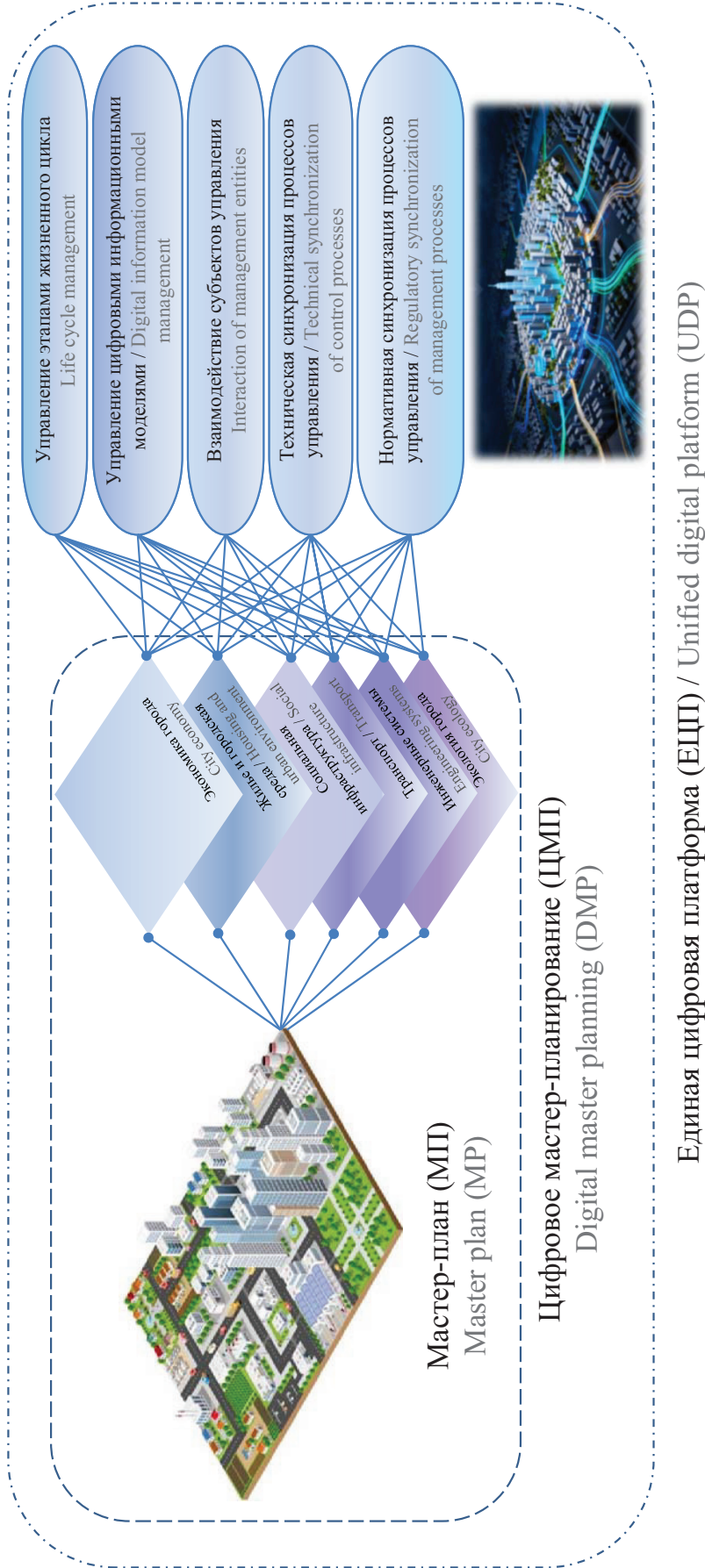


Рис. 1. Визуализация концепции трансформации цифрового мастер-планирования под задачи непрерывного ЖЦ ОКИ (составлено авторами)  
Fig. 1. Visualization of the concept of transforming digital master planning for the continuous life cycle of public utility infrastructure facilities (compiled by the authors)

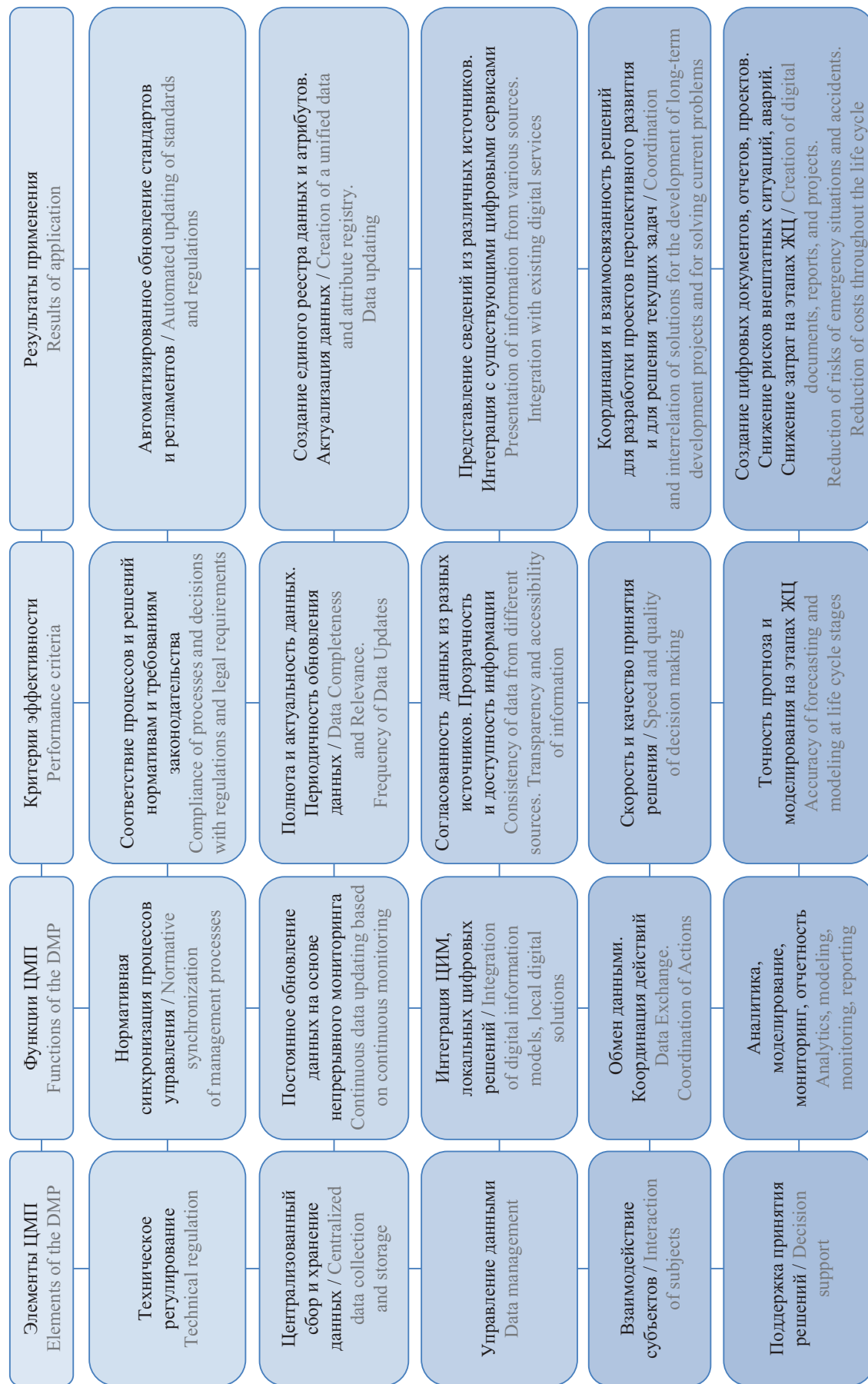


Рис. 2. Схема единой цифровой платформы управления ЖЦ ОКИ на основе ЦМП (составлено авторами)  
 Fig. 2. Scheme of a unified digital platform for managing the life cycle of public utility infrastructure facilities based on the DMP (compiled by the authors)

Результаты сравнительного анализа систем управления технической эксплуатацией ОКИ (составлено авторами)

Results of a comparative analysis of technical operation management systems for public utility infrastructure facilities (compiled by the authors)

Система управления эксплуатацией ОКИ Management system for the operation of public utility infrastructure facilities	Особенности Features	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Ответная / Responsive	Выполняемая по факту отклонения, нарушения Performed based on the actual deviation or violation	Низкая стоимость в краткосрочной перспективе Low short-term cost	Высокие потери ресурсов, ущербы от аварий, снижение долговечности, внеплановые простои, социальная напряженность / High resource losses, damage from accidents, reduced service life, unscheduled downtime, social tensions
Профилактическая Preventative	Выполняемая по нормативным требованиям Performed based on regulatory requirements	Снижение отказов, простоев Reduced failures and downtime	Недоучет остаточного ресурса, недоучет влияния фактических условий эксплуатации, высокая вероятность случайных отказов, повышенные эксплуатационные затраты в среднесрочной перспективе / Underestimation of residual service life, underestimation of the impact of actual operating conditions, high probability of random failures, increased operating costs in the medium term
Предупредительная Precautionary	Выполняемая по функциональному состоянию / Performed based on the functional state	Снижение потребляемых ресурсов, повышение безопасности функционирования, снижение затрат в среднесрочной перспективе / Reduced resource consumption, improved operational safety, and reduced medium-term costs	Необходимость инвестиций в персонал и технологии диагностики / Need for investment in personnel and diagnostic technologies
Предикативная Predictive	Выполняемая по результатам прогноза и моделирования Performed based on the results of forecasting and modelling	Повышение надежности функционирования, снижение затрат в среднесрочной перспективе, социальная удовлетворенность, учет перспектив развития территорий / Increased operational reliability, reduced medium-term costs, increased social satisfaction, and consideration of regional development prospects	Необходимость инвестиций в персонал и цифровые технологии, необходимость разработки цифровых информационных моделей Need for investment in personnel and digital technologies, need for development of digital information models

нии износа и оценке последствий выбранных стратегий обслуживания и ремонта (рис. 1).

Для быстрого реагирования и перенастройки системы планирования на этапе эксплуатации необходимы верифицированные данные, которые должны быть представлены в виде единого реестра, включающего полные сведения о коммунальных сетях и сооружениях, их собственниках, протяженности и степени изно-

са, мощности, предельной нагрузки, средств мониторинга, плановых сроков технического обслуживания, текущего и капитального ремонта [22–24].

Таким образом, на основании результатов выполненного аналитического обзора сформулирована цель исследования, которая заключается в изучении возможностей и перспектив применения цифрового мастер-планирования для управления единым

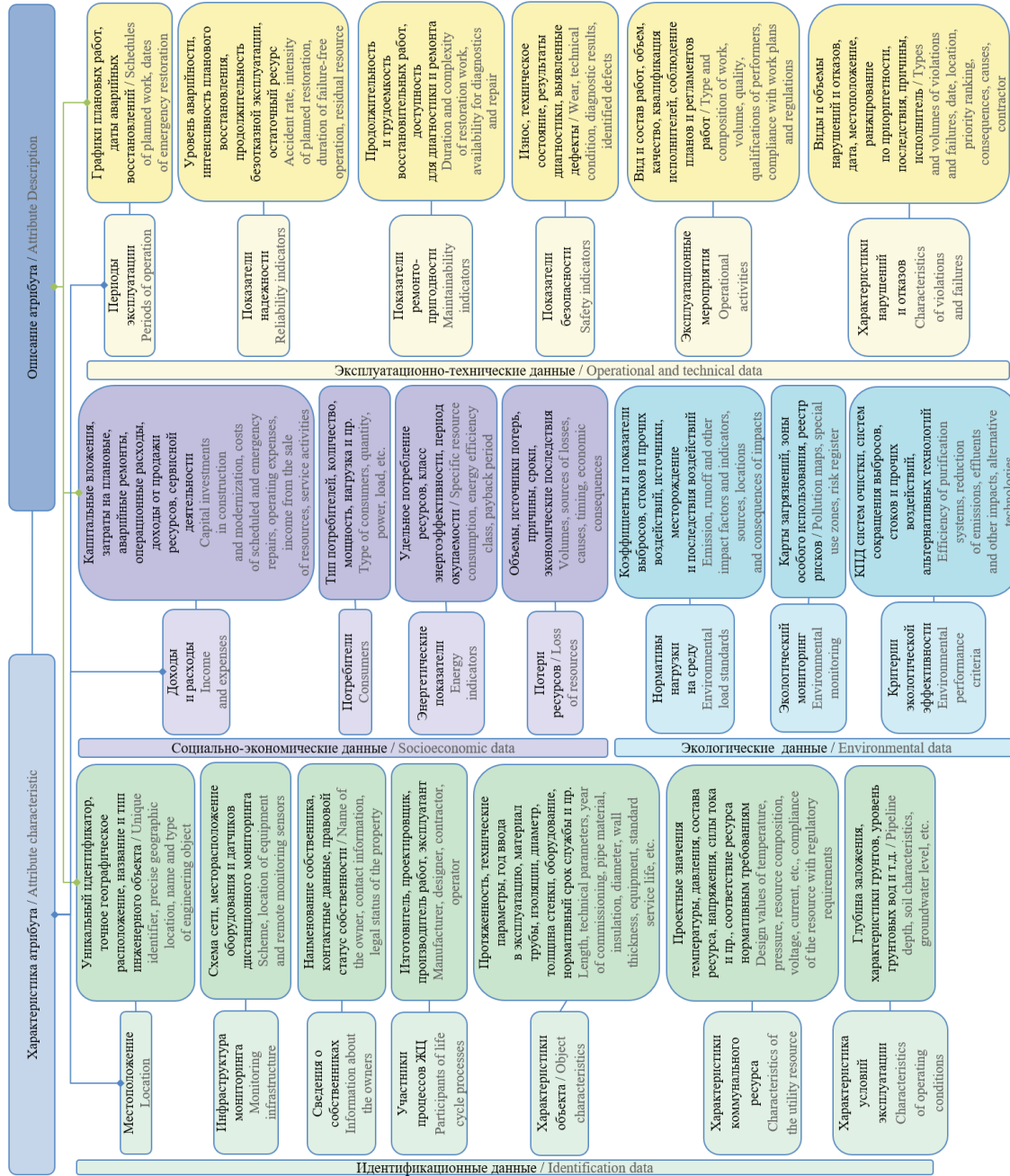


Рис. 3. Атрибуты реестра данных в ЦМП для управления ЖЦ ОКИ (составлено авторами)  
 Fig. 3. Attributes of the data register in the DMP for managing the life cycle of public utility infrastructure facilities (compiled by the authors)

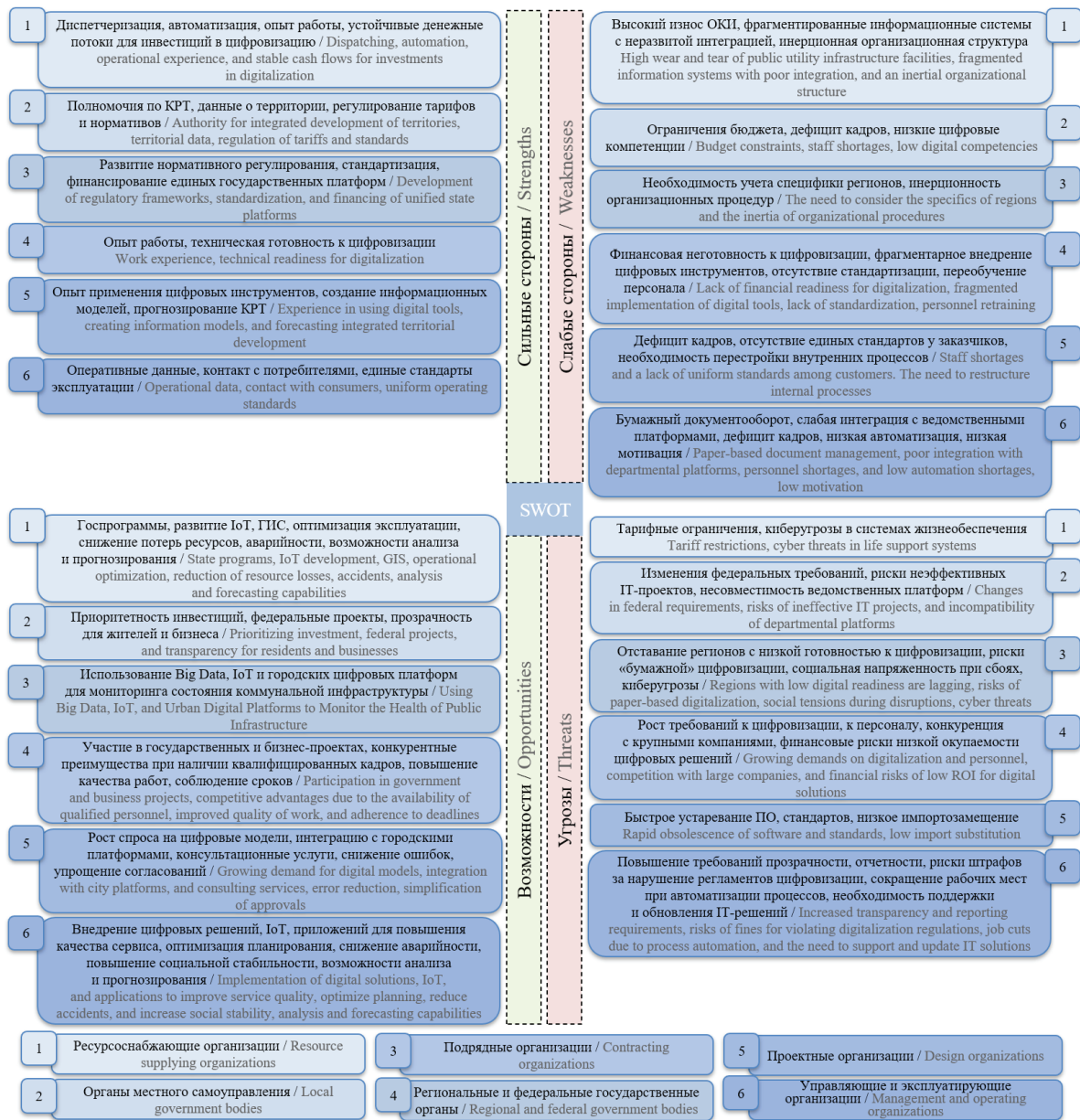


Рис. 4. SWOT-анализ перспектив внедрения ЕЦП для различных участников ЖЦ ОКИ (составлено авторами)

Fig. 4. SWOT analysis of the prospects for the implementation of UDP for various participants in the life cycle of public utility infrastructure facilities (compiled by the authors)

ЖЦ ОКИ, включая этап эксплуатации. В задачи исследования входили:

- разработка системы критериев для оценки эффективности использования ЦМП на этапе эксплуатации объектов коммунальной инфраструктуры;
- системный анализ проблем и преимуществ, рисков и возможностей использования ЦМП для субъектов — участников различных этапов ЖЦ ОКИ;
- структурирование системы атрибутов, необходимых для создания реестра данных и имеющих первоочередное значение для планирования предиктивной эксплуатации ОКИ;

- визуализация элементов единой платформы управления ЖЦ ОКИ на основе ЦМП в виде блок-схемы и разработка рекомендаций по ее внедрению.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполненный аналитический обзор актуальной научной литературы в области цифровизации различных этапов ЖЦ ОКИ показал [25], что в настоящее время вопросы перестройки системы управления на основе цифровых решений являются разрозненными, фрагментированными и недостаточно скоординированными. В сквозном управлении не учтены эксплуатационные процессы. Поэтому объектом ис-



Рис. 5. Блок-схема плана действий по созданию единой цифровой платформы управления ЖЦ ОКИ на основе ЦМП (составлено авторами)

Fig. 5. Block diagram of the action plan for the creation of a unified digital platform for managing the life cycle of public utility infrastructure facilities based on the DMP (compiled by the authors)

следования стал процесс управления эксплуатацией коммунальной инфраструктуры на основе ЕЦП комплексного развития территории. Предмет исследования — цифровое мастер-планирование как инструмент создания интегрированной с существующими информационными системами ЕЦП для сквозной системы поддержки принятия решения на всех этапах ЖЦ ОКИ.

На основе сравнительного анализа были сопоставлены системы управления эксплуатацией ОКИ и выполнена оценка зрелости ЦМП для интеграции в эксплуатационный процесс. Это позволило авторам составить блок-схему ЕЦП с визуализацией ключевых элементов и функций. На основе экспертного метода авторами предложена система критериев оценки эффективности применения ЦМП для управления ЖЦ ОКИ (рис. 2).

Оценка эффективности применения единой платформы может осуществляться различными субъектами с учетом их приоритетов, нормативных требований, экономического обоснования. В случае экспертной оценки всех участников, работающих над совместным проектом, авторами предложен вариант многокритериальной оценки на основе метода свертки по сумме взвешенных баллов, где каждому критерию присваивается вес в соответствии с его значимостью для конкретного субъекта, а итоговая оценка определяется по формуле:

$$E = \sum_{j=1}^m v_j \cdot \left( \sum_{i=1}^n k_i \cdot \omega_i \right) \rightarrow \max,$$

где  $E$  — оценка эффективности применения для субъектов ЦМП как инструмента принятия решения;  $v$  — вес субъекта, в сумме составляющий 100 %;  $j$  — коли-

чество субъектов;  $k$  — весомость критерия сравнения, в сумме составляющая 100 %;  $i$  — количество критериев сравнения;  $\omega$  — оценка критерия со стороны субъекта, отражающая степень удовлетворения его требованиям или ожиданиям по данному критерию.

Вес субъектов может определяться при работе над каждым проектом индивидуально. Он зависит от его влияния на конечное решение, заинтересованности, ответственности, опыта, репутации, компетентности и прочего. На основании многокритериальной оценки возможна адаптация ЕЦП, ее ключевых элементов под приоритеты разных участников.

Далее авторами был выполнен SWOT-анализ изменений для ключевых участников процесса управления ЖЦ ОКИ и на основе структурированных ключевых элементов ЦМП разработаны рекомендации по его внедрению в ЖЦ ОКИ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам аналитического обзора актуальных нормативных документов, сводов, правил, стандартов, опыта эксплуатации [26] авторы выполнили сравнительный анализ систем управления эксплуатацией ОКИ (табл.).

Для организации предикативной эксплуатации ОКИ необходимо создание реестра данных, который позволит моделировать и прогнозировать износ коммунальных сетей и оборудования, разрабатывать стратегии их модернизации, продлять сроки эксплуатации, минимизировать финансовые расходы, потери коммунальных ресурсов, тем самым создавая комфортную городскую среду и снижая социальную напряженность общества. Авторами предложен перечень атрибутов для создания реестра данных в ЦМП, значимых, в том числе, для принятия решений на этапе эксплуатации (рис. 3).

Единая цифровая платформа управления ЖЦ ОКИ позволит включить в этап взаимодействия не только государственные структуры, проектные, подрядные и ресурсоснабжающие организации, но и управляющие и эксплуатирующие организации, а также конечных пользователей коммунальных услуг и ресурсов [27]. По результатам выполненного SWOT-анализа проблем и преимуществ ЦМП авторами разработана матрица, по которой каждый субъект сможет оценить текущие возможности и перспективы, а также вероятные риски и их последствия (рис. 4).

В ноябре 2024 г. Распоряжением Правительства Москвы № 64-16-684/24 был утвержден «Порядок утверждения алгоритмов ЦМП территории города Москвы», разработанный департаментом информационных технологий. Для решения задач по разработке таких алгоритмов авторами по результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по внедрению ЦМП в ЖЦ ОКИ, блок-схема которых представлена на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Управление ЖЦ ОКИ должно быть основано на системном подходе, охватывающем полный спектр

операций по созданию, прокладке, эксплуатации и модернизации сетей и сооружений на них, взаимной увязке с комплексным развитием города и использованием современных цифровых методов и технологических решений. Сейчас планирование эксплуатации ОКИ базируется на нормативных документах, текущем мониторинге состояния сетей и объемах ремонтных работ. Оно осуществляется разрозненно, что не позволяет выполнять комплексный анализ и прогнозирование и затрудняет своевременное выявление проблем и оптимизацию ресурсов. Авторами было предложено формирование единой цифровой платформы, в основу которой может быть положено цифровое мастер-планирование для управления всеми этапами ЖЦ ОКИ, в частности для разработки сценариев износа и формирования дорожных карт адаптивного планирования эксплуатационных мероприятий.

Из результатов анализа представленных выше исследований можно сделать вывод о том, что отсутствие единого реестра систематизированной информации о расположении, техническом состоянии и параметрах эксплуатации инженерных коммуникаций ведет к негативным последствиям. Без достоверных данных сложно провести эффективное планирование модернизации и своевременные ремонты сетей, что приводит к их быстрому износу и частым авариям. Представленный авторами перечень атрибутов поможет эффективно отслеживать состояние ОКИ в режиме реального времени всем участникам эксплуатационного процесса и в дальнейшем снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций, создающих угрозу для комфорта и безопасности жителей. Он позволит не только контролировать техническое состояние, но и решать проблемы бесхозных сетей, проводить их инвентаризацию, отрегулировать вопросы балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности.

Внедрение мастер-планирования в оперативное управление приносит очевидные преимущества: сокращается время отклика на заявки по обслуживанию и достигается экономия за счет сокращения финансовых затрат и снижения потерь ресурсов, улучшается координация между коммунальными службами, управляющими организациями, подрядчиками, городскими службами. Стандартизация процедур обеспечит оценку принятых решений на непротиворечивость, минимизацию ошибок и стоимости, ресурсную реализуемость решений, ускорение их принятия.

Разработанная система критериев для оценки эффективного использования ЦМП дает возможность обеспечить гибкое реагирование и изменение единой цифровой платформы под потребности субъектов. Разработанные рекомендации по внедрению ЕЦП на основе ЦМП могут быть использованы для развития системы предикативной эксплуатации, повышения качества сервиса потребителей. Дальнейшие исследования лежат в направлении развития систем планирования эксплуатационным процессом на основе применения интеллектуальных систем, IoT и цифровых информационных моделей ОКИ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Зайцев К.А.* К вопросу о предупреждении тенденции роста износа инженерных сетей жилищно-коммунального хозяйства // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : сб. докл. 2024. С. 67–72. EDN TNCFGP.
2. *Grabovyy P.G., Doan D.H., Nelyubov A.V.* An organizational and economic mechanism for planning the development of systems that are part of the urban utility infrastructure // *Real Estate: Economics, Management*. 2021. No. 3. Pp. 41–47. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-3-41-47. EDN AAYQWT.
3. *León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M.* Characterization of the information system integrated to the construction project management systems // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Issue 11. P. e31886. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31886. EDN QNKGYS.
4. *Евтушенко С.И., Куценко М.Д.* Использование технологии дополненной реальности на этапах жизненного цикла объекта капитального строительства // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 11. С. 1813–1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820. EDN IOBIMY.
5. *Che-Ghani N.Z., Myeda N.E., Ali A.S.* Operations and Maintenance Cost for Stratified Buildings : a Critical Review // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 66. P. 00041. DOI: 10.1051/mateconf/20166600041
6. *Dement'eva M.* Integrated technique of planning the capital repair of residential buildings and objects of transport infrastructure // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90. P. 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012052
7. *Крыгин А.А.* Оценка параметров распределения Вейбулла при малом объеме выборки в задачах оптимизации планирования ремонтных работ на инженерных сетях // *Управление большими системами : сборник трудов*. 2020. № 84. С. 177–197. DOI: 10.25728/ubs.2020.84.9. EDN LTPOYF.
8. *Antipova A., Eremina D., Shakirova T.* The uniform information virtual space of construction organizations as an effective control of the construction process management // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. P. 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201817001005
9. *Кадышева В.В., Статива Е.Б.* Проблемы методических подходов к определению критериев аварийности жилых зданий в рамках ССТЭ // *Недвижимость: экономика, управление*. 2024. № S3. С. 232–236. EDN LUGQCS.
10. *Князева Н.В., Назойкин Е.А., Орехов А.А.* Современные подходы к оценке технического состояния строительных конструкций зданий на этапе эксплуатации // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 3. С. 131–142. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.131-142. EDN XKJHFQ.
11. *Сергеева А.Ю., Русанов Д.И., Мясущев Р.Ю., Сергеев Ю.Д.* Организационно-технологические решения при расчете риска аварий и организации контроля безопасности стройобъекта // *Строительство и недвижимость*. 2025. № 2 (17). С. 41–46. EDN FFCSJB.
12. *Knedlová J., Bílek O., Sámek D., Chalupa P.* Design and construction of an inspection robot for the sewage pipes // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 121. P. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/201712101006
13. *Дементьева М.Е., Педяш Е.В.* Перспективы интеллектуализации зданий при реконструкции жилой застройки // *Научное обозрение*. 2017. № 20. С. 167–170. EDN ZRNQCL.
14. *Емельянов М.В.* Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 4. С. 123–131. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131. EDN ZXIANP.
15. *Dement'eva M., Dement'eva A.* Cartographic modeling for monitoring the technical condition of urban development objects // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. P. 01079. DOI: 10.1051/mateconf/201817001079
16. *Шестов А.В., Фамина Н.В., Павлова А.С., Хафизов К.В., Комзатов В.И.* Цифровизация ЖКХ в России: вызовы и перспективы // *Экономика строительства*. 2025. № 5. С. 280–282. EDN JRYBXJ.
17. *Surkova L.E.* GIS HCS: analytical capabilities of the open section of the system for educational purposes // *Real Estate: Economics, Management*. 2024. No. 4. Pp. 65–72. EDN VUXXIR.
18. *Чесноков А.С., Чеснокова Е.А., Муковнин С.Ю., Кобова М.Ю.* Улучшение качества работы ЖКХ с применением автоматизированной информационной системы // *Строительство и недвижимость*. 2024. № 2 (15). С. 179–184. EDN EFCJBV.
19. *Ботарева Е.А.* Совершенствование отрасли жилищно-коммунального хозяйства с помощью ГИС ЖКХ // *Наука XXI века: актуальные направления развития*. 2022. № 1–1. С. 10–12. DOI: 10.46554/ScienceXXI-2022.03-1.1-pp.10. EDN ZMEUJR.
20. *Гвоздева О.В., Тынышева А.М., Шульженко А.Г., Стародубцева О.С.* Цифровое мастер-планирование — новые горизонты в управлении городскими территориями // *Московский экономический журнал*. 2025. Т. 10. № 2. С. 164–182. DOI: 10.55186/2413046X\_2025\_10\_2\_41. EDN RPNAVY.
21. *Береговских А.Н.* Принципы формирования цифровой информационной модели для эффективного управления развитием территорий на основе комплексного градостроительного проектирования // *Вестник евразийской науки*. 2024. Т. 16. № 4. С. 10. EDN VXPVOD.

22. Овсянникова М.Н. Эффективность функционирования строительного комплекса на основе применения инновационных решений // Наука XXI века: вызовы, становление, развитие : сб. ст. XXII Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 95–103. EDN NMFADR.

23. Хавин Д.В., Горбунов С.В., Беккер П.П. Экономические аспекты конкурентоспособности предприятий строительной отрасли с учетом инновационного потенциала // Инновации и инвестиции. 2019. № 7. С. 265–269.

24. Гуринович В.Ю. Комплексное исследование развития индустриального домостроения // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 5. С. 397–409. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409. EDN AVHHFG.

25. Альшрайдех М., Енговатов И.А., Морозенко А.А. Структура и содержание платформы управления стадиями жизненного цикла АЭС // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 2. С. 18–31. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.18-31. EDN SGNHNO.

26. Dement'eva M.E. Planning of Operational and Technological Measures based on Logical and Graphical Modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. Issue 5. P. 052026. DOI: 10.1088/1755-1315/988/5/052026

27. Олейник П.П. Основные тенденции развития организации строительного производства // Строительное производство. 2022. № 2. С. 21–25. DOI: 10.54950/26585340\_2022\_2\_21. EDN VEAEPD.

Поступила в редакцию 13 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 26 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Марина Евгеньевна Дементьева** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2467-3290, РИНЦ ID: 309561, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; 7dem@mail.ru;

**Анна Сергеевна Малькова** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; инженер производственно-технического отдела; **ПРАЙМКЕЙ**; 125047, г. Москва, ул. 1-я Тверская-Ямская, д. 23 с1; SPIN-код: 2429-6052, РИНЦ ID: 1193372, ORCID: 0009-0004-6997-7853; malkova\_as@bk.ru.

Вклад авторов:

Дементьева М.Е. — идея, научное руководство, формулирование концепции исследования, научное редактирование текста.

Малькова А.С. — сбор материала, обработка материала, проведение исследования, написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Zajcev K.A. On the issue of preventing the trend of increasing wear and tear of utility networks in housing and communal services. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov : conference proceedings*. 2024; 67-72. EDN TNCFGP. (rus.).

2. Grabovyy P.G., Doan D.H., Nelyubov A.V. An organizational and economic mechanism for planning the development of systems that are part of the urban utility infrastructure. *Real Estate: Economics, Management*. 2021; 3:41-47. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-3-41-47. EDN AAYQWT.

3. León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M. Characterization of the information system integrated to the construction project management systems. *Heliyon*. 2024; 10(11):e31886. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31886. EDN QNKGYP.

4. Evtushenko S.I., Kuzenko M.D. Use of augmented reality technology at the stages of the life cycle of a capi-

tal construction facility. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(11):1813-1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820. EDN IOBIMY. (rus.).

5. Che-Ghani N.Z., Myeda N.E., Ali A.S. Operations and Maintenance Cost for Stratified Buildings : a Critical Review. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 66:00041. DOI: 10.1051/mateconf/20166600041

6. Dement'eva M. Integrated technique of planning the capital repair of residential buildings and objects of transport infrastructure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90:012052. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012052

7. Krygin A. Evaluation of the Weibull distribution parameters for small volume of the sample in the problems of optimization of planning repair works on engineering networks. *Large-Scale Systems Control*. 2020; 84:177-197. DOI: 10.25728/ubs.2020.84.9. EDN LTPOYF. (rus.).

8. Antipova A., Eremina D., Shakirova T. The uniform information virtual space of construction organi-

zations as an effective control of the construction process management. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:01005. DOI: 10.1051/mateconf/201817001005

9. Kadyshcheva V.V., Stativa E.B. Issues of methodical approaches to accident rate of residential buildings determination in term of forensic construction-technical expertise. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; S3:232-236. EDN LUGQCX. (rus.).

10. Knyazeva N.V., Nazojkin E.A., Orekhov A.A. Modern approaches to assessing the technical condition of building structures at the operational stage. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(3):131-142. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.131-142. EDN XKJHFQ. (rus.).

11. Sergeeva A.Yu., Rusanov D.I., Myasishchev R.Yu., Sergeev Yu.D. Organizational and technological solutions for calculation of the risk of accidents and organization of safety control of the construction site. *Construction and Real Estate*. 2025; 2(17):41-46. EDN FFCSJB. (rus.).

12. Knedlová J., Bílek O., Sámek D., Chalupa P. Design and construction of an inspection robot for the sewage pipes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 121:01006. DOI: 10.1051/mateconf/201712101006

13. Dement'eva M.E.E., Pedyash E.V. E. Prospects of intellectualizing buildings in the course of housing reconstruction. *Science Review*. 2017; 20:167-170. EDN ZRNCQL. (rus.).

14. Emelyanov M.V. Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(4):123-131. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131. EDN ZXIAHP. (rus.).

15. Dement'eva M., Dement'eva A. Cartographic modeling for monitoring the technical condition of urban development objects. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:01079. DOI: 10.1051/mateconf/201817001079

16. Shestov A.V., Famina N.V., Pavlova A.S., Khafizov K.V., Komzalov V.I. Digitalization of the housing and utilities sector in Russia: challenges and prospects. *Construction Economics*. 2025; 5:280-282. EDN JRYBXJ. (rus.).

17. Surkova L.E. GIS HCS: analytical capabilities of the open section of the system for educational purposes. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; 4:65-72. EDN VUXXIR.

18. Chesnokov A.S., Chesnokova E.A., Mukovnin S.Yu., Kobova M.Yu. Improving the quality of housing

and communal services using an automated information system. *Construction and Real Estate*. 2024; 2(15):179-184. EDN EFCJBV. (rus.).

19. Botareva E.A. Improvement of the industry of housing and utilities with the help of GIS HUS. *Science of the 21st Century: Current Development Directions*. 2022; 1-1:10-12. DOI: 10.46554/ScienceXXI-2022.03-1.1-pp.10. EDN ZMEUJR. (rus.).

20. Gvozdeva O., Tynysheva A., Shul'zhenko A., Starodubceva O. Digital master planning — new horizons in the management of urban areas. *Moscow Economic Journal*. 2025; 10(2):164-182. DOI: 10.55186/2413046X\_2025\_10\_2\_41. EDN RPWAYG. (rus.).

21. Beregovskikh A.N. Principles of formation of a digital information model for effective management of territorial development based on integrated urban planning. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(4):10. EDN VXPVOD. (rus.).

22. Ovsyannikova M.N. The effectiveness of functioning of the construction complex based on the implementation of innovative solutions. *Science of the XXI century: challenges, formation, development : collection of articles from the XXII International scientific and practical conference*. 2025; 95-103. EDN NMFADR. (rus.).

23. Havin D.V., Gorbunov S.V., Bekker P.R. Economic aspects of competitiveness of enterprises in the construction industry taking into account the innovation potential. *Innovations and Investments*. 2019; 7:265-269. (rus.).

24. Gurinovich V.Yu. The comparative study of the development on prefabricated construction. *Science and Technique*. 2022; 21(5):397-409. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409. EDN AVHHFG. (rus.).

25. Alshraideh M., Engovatov I.A., Morozenko A.A. Structure and content of the NPP life cycle stage management platform. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(2):18-31. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.18-31. EDN SGNNHO. (rus.).

26. Dement'eva M.E. Planning of Operational and Technological Measures based on Logical and Graphical Modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988(5):052026. DOI: 10.1088/1755-1315/988/5/052026

27. Oleynik P.P. Main development trends organizations of construction production. *Construction Production*. 2022; 2:21-25. DOI: 10.54950/26585340\_2022\_2\_21. EDN VEAEPD. (rus.).

Received December 13, 2025.

Adopted in revised form on December 18, 2025.

Approved for publication on December 26, 2025.

BIOTNOTES: **Marina E. Dement'eva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2467-3290, ID RSCI: 309561, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; 7dem@mail.ru;

**Anna S. Malkova** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; engineer of the Production and Technical Department; **PRIMEKEY**; 23 c1, 1st Tverskaya-Yamskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; SPIN-code: 2429-6052, ID RSCI: 1193372, ORCID: 0009-0004-6997-7853; malkova\_as@bk.ru.

*Contribution of the authors:*

*Marina E. Dement'eva — scientific guidance, formulation of the research concept and scientific text editing.*

*Anna S. Malkova — the idea, collecting the material, processing the material, conducting research, writing the source text.*

*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). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. 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.

**Bi o n o t e s:** **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 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 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 2026 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 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 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 2026 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 безоплатательно 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 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 - 573.34 руб. х 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

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 \_\_\_\_\_

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 - 573.34 руб. х 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

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 \_\_\_\_\_

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/>

