

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 8  
2025**

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

Сквозной номер 201

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 8  
2025**

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	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.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	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.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	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>
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
E-mail:	<a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	28.08.2025.
Подписан в свет	29.08.2025.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,44. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 256	

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

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

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

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

**Станислав 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

*Владимир Викторович Дёмкин*

**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 Федерального государственного бюджетного учреждения «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 архи-

тектурно-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

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

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

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

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

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

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



# VESTNIK <sup>MGSU</sup>

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

## Thematic sections

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

<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Publication Frequency:</b>	Monthly
<b>Founders:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
<b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b>	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
<b>Publisher:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Printing House:</b>	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
<b>Website journal:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Subscription:</b>	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
<b>Signed for printing:</b>	28.08.2025

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2025

## 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 Banaszkuk**, 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*

*Vladimir V. Demkin*

**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

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

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

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

**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

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

*А.Г. Тамразян, В.Р. Мешков, В.С. Геращенко, А.С. Гришин*  
Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности  
железобетонных конструкций в условиях пожара . . . . . 1135

*А.Л. Кришан, В.И. Римшин, М.А. Астафьева, М.А. Лихидько*  
Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов . . . . . 1154

*В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, Н.В. Федорова*  
Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных  
конструкций . . . . . 1165

*Ю.Б. Филатов, О.Ю. Сапожникова*  
Определение опасного ослабления поперечного сечения металлической дымовой трубы . . . . . 1178

*Д.Н. Лазовский, А.И. Гиль, Д.О. Глухов*  
Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов  
с учетом сдвига . . . . . 1187

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, А.А. Тимофеева, П.А. Скубовская, В.А. Смолий*  
Фторидно-боратные смеси как интенсификатор вспенивания шлаковых отходов тепловых  
электростанций . . . . . 1199

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*Е.Н. Акбулякова, К.А. Казаринова, Е.Д. Телепова*  
Анализ влияния циклического нагружения на осадку глинистого основания резервуара . . . . . 1211

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.  
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*И.Г. Ершова, З.Ф. Мамедов, Р.В. Семенов*  
Актуальные вызовы организационного управления высокотехнологичными проектами компаний  
региона . . . . . 1221

*А.Д. Елфимова, Ф.Г. Малиева, Д.Д. Пашаходжаева*  
Цифровой маркетинг как инструмент продвижения регионов . . . . . 1232

*И.А. Кириченко, Т.Н. Маршова, И.Н. Мигунов, И.Б. Петросян*  
Строительство: тенденции, факторы и ограничения в контексте стратегических приоритетов  
развития страны . . . . . 1242

*Е.В. Романова, Д.Р. Хаирова*  
Система наставничества в строительных организациях на этапе перехода к нормативно-правовому  
регулированию . . . . . 1264

*А.А. Липидус, Л.А. Адамцевич*  
Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного  
развития территорий . . . . . 1278

Требования к оформлению научной статьи . . . . . 1292

CONTENTS

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

*Ashot G. Tamrazian, Vadim R. Meshkov, Vitaliy S. Gerashchenko, Andrei S. Grishin*  
**Approximation of concrete thermophysical properties to solve the nonlinear problem of heat conduction of reinforced concrete structures under fire conditions . . . . . 1135**

*Anatoly L. Krishan, Vladimir I. Rimshin, Maria A. Astafieva, Mikhail A. Likhidko*  
**Strength of centrally compressed concrete tube elements . . . . . 1154**

*Vladimir I. Kolchunov, Pavel A. Korenkov, Natalia V. Fedorova*  
**Experimental research programme of complex stressed nodes of reinforced concrete structures . . . . . 1165**

*Yury B. Filatov, Oksana Yu. Sapozhnikova*  
**Determination of dangerous weakening of the metal chimney cross-section . . . . . 1178**

*Dzmitry N. Lazouski, Artur I. Hil, Dzmitry O. Hlukhau*  
**Deformation approach to the calculation of shear strength in transverse bending of wooden elements . . . . . 1187**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Boris M. Goltsman, Elena A. Yatsenko, Anna A. Timofeeva, Polina A. Skubovskaya, Victoria A. Smoliy*  
**Fluoride-borate mixtures as a foaming intensifier for TPP slag wastes . . . . . 1199**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Evgeniya N. Akbulyakova, Karina A. Kazarinova, Ekaterina D. Telepova*  
**Analysis of the influence of cyclic loading on the settlement of clay base of tank . . . . . 1211**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.  
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

*Irina G. Ershova, Zahid F. Mamedov, Roman V. Semenov*  
**Current challenges of the modern model of organizational management of high-tech projects in the region . . . . 1221**

*Aina D. Elfimova, Ferida G. Malieva, Dildora D. Pashakhodzhaeva*  
**Digital marketing as a place promotion tool . . . . . 1232**

*Irina A. Kirichenko, Tatyana N. Marshova, Ivan N. Migunov, Irina B. Petrosyan*  
**Construction: trends, factors and constraints in the context of the country’s strategic development priorities. . . . . 1242**

*Elena V. Romanova, Dinara R. Khairova*  
**The mentoring system in construction organizations at the stage of transition to regulatory framework . . . . . 1264**

*Azariy A. Lapidus, Liubov A. Adamtsevich*  
**Scenario-oriented design of construction projects in integrated territorial development projects . . . . . 1278**

**Requirements for research paper design . . . . . 1292**



## 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).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.97-98

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153

## Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности железобетонных конструкций в условиях пожара

Ашот Георгиевич Тамразян<sup>1</sup>, Вадим Ростиславович Мешков<sup>2</sup>,  
Виталий Сергеевич Геращенко<sup>1,3</sup>, Андрей Сергеевич Гришин<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия;*

<sup>3</sup> *Атомэнергопроект; г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Настоящая статья посвящена разработке методов аппроксимации теплофизических свойств бетона при решении нелинейной задачи теплопроводности. Исследование актуально в контексте оценки огнестойкости строительных конструкций и повышения их безопасности в условиях пожара. Цель работы заключается в создании универсальных моделей зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры, что позволяет улучшить точность расчетов температурных полей.

**Материалы и методы.** Для анализа использованы экспериментальные данные из множества источников, а также известные стандарты (например, Eurocode 2). Применяются методы наименьших квадратов для построения регрессий и аппроксимаций. Рассмотрены различные типы бетона — от легких до тяжелых — и их поведение при нагреве до высоких температур. Анализируется влияние таких факторов, как пористость, состав заполнителя, влажность, на теплофизические характеристики материала.

**Результаты.** Получены новые аппроксимационные формулы для коэффициента теплопроводности бетона как функции плотности и температуры. Показано, что зависимость может быть успешно описана универсальной экспоненциальной моделью. Для удельной теплоемкости предложена линейная аппроксимация, которая демонстрирует хорошее совпадение с экспериментальными данными. Установлено, что эффективная теплоемкость возрастает в определенных диапазонах температур за счет эндотермических процессов, таких как дегидратация цементного камня и декарбонизация известняка. Результаты подтверждены сравнением с существующими моделями и нормативами.

**Выводы.** Разработанные аппроксимационные модели позволяют более точно прогнозировать поведение бетона при воздействии высоких температур. Это имеет важное практическое значение для проектирования огнестойких конструкций, особенно в ядерной энергетике и других отраслях, где безопасность играет ключевую роль. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения существующих инженерных подходов и создания новых стандартов. В дальнейшем планируется продолжить исследования с учетом дополнительных факторов, таких как массоперенос и изменение структуры материала в ходе нагрева.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** теплофизические свойства, бетон, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, аппроксимация, огнестойкость, нелинейная задача теплопроводности

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тамразян А.Г., Мешков В.Р., Геращенко В.С., Гришин А.С. Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности железобетонных конструкций в условиях пожара // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1135–1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153

*Автор, ответственный за переписку:* Виталий Сергеевич Геращенко, geraschenko\_vs@aep.ru.

# Approximation of concrete thermophysical properties to solve the nonlinear problem of heat conduction of reinforced concrete structures under fire conditions

Ashot G. Tamrazian<sup>1</sup>, Vadim R. Meshkov<sup>2</sup>,  
Vitaliy S. Gerashchenko<sup>1,3</sup>, Andrei S. Grishin<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>3</sup> Atomenergoproekt; Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** This paper is dedicated to the development of methods for approximating the thermophysical properties of concrete when solving a nonlinear heat conduction problem. The research is relevant in the context of assessing the fire resistance of building structures and enhancing their safety during fires. The goal of the work is to create universal models that describe the dependence of the thermal conductivity coefficient and specific heat capacity on temperature, which will improve the accuracy of temperature field calculations.

**Materials and methods.** Experimental data from numerous sources, as well as known standards (e.g., Eurocode 2), were used for analysis. The study employs the method of least squares (MLS) for constructing regressions and approximations. Various types of concrete — from lightweight to heavyweight — and their behaviour when heated to high temperatures were considered. Special attention was given to the influence of porosity, aggregate composition, and moisture content on the material's thermophysical characteristics.

**Results.** New approximation formulas for the thermal conductivity coefficient of concrete as a function of density and temperature have been obtained. It has been shown that this dependence can be successfully described by a universal exponential model. A linear approximation for specific heat capacity was proposed, demonstrating good agreement with experimental data. It was established that effective heat capacity increases within certain temperature ranges due to endothermic processes such as cement stone dehydration and limestone decarbonization. The results were confirmed by comparison with existing models and regulations.

**Conclusions.** The approximation models developed in this work allow for more accurate predictions of concrete behaviour under high-temperature exposure. This has significant practical importance for designing fire-resistant structures, especially in nuclear energy and other sectors where safety plays a crucial role. The findings can be used to improve existing engineering approaches and develop new standards. Future research is planned to consider additional factors, such as mass transfer and changes in material structure during heating.

**KEYWORDS:** thermophysical properties, concrete, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, approximation, fire resistance, nonlinear heat conduction problem

**FOR CITATION:** Tamrazian A.G., Meshkov V.R., Gerashchenko V.S., Grishin A.S. Approximation of concrete thermophysical properties to solve the nonlinear problem of heat conduction of reinforced concrete structures under fire conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1135-1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153 (rus.).

Corresponding author: Vitaly S. Gerashchenko, [gerashchenko\\_vs@aep.ru](mailto:gerashchenko_vs@aep.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность решения задачи огнестойкости бетонных строительных конструкций в условиях пожара не вызывает сомнений, особенно в контексте повышения безопасности зданий и сооружений. Одним из ключевых факторов, влияющих на поведение бетона при воздействии высоких температур, являются его теплофизические свойства — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость. Эти параметры существенно изменяются при нагреве материала.

Данная работа служит продолжением предыдущих исследований авторов [1], направленных на решение нелинейной задачи теплопроводности бетона при одностороннем нагреве в условиях «стандартного пожара». Основная цель настоящего исследования заключается в создании универсальных моделей зависимости коэффициента теплопроводности

и удельной теплоемкости от температуры, которые помогли бы улучшить точность расчетов температурных полей.

Моделирование температурных полей в бетонных конструкциях в условиях пожара — достаточно сложная задача, особенно если учитывать специфические свойства материала. Одна из существенных особенностей, усложняющих моделирование и анализ, состоит в том, что теплофизические параметры бетона — его удельная плотность  $\rho$ , удельная теплоемкость  $c$  и коэффициент теплопроводности  $k$  — изменяются при изменении температуры.

Для быстрой оценки температурного состояния бетонных конструкций используют линейное приближение, считая теплофизические параметры постоянными. Более точную картину позволяет получить численное моделирование с учетом информации о теплофизических свойствах конкретной марки бетона. В таких расчетах применяют темпера-

турные зависимости из стандартов типа Eurocode 2<sup>1</sup>, причем для разных типов бетонов эти зависимости различны. Так, например, отечественный стандарт СП 468.1325800.2019<sup>2</sup> предлагает использовать линейные зависимости  $c(T)$  и  $k(T)$  удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры. При этом в уравнении теплопроводности (см. раздел «Нелинейная основная тепловая задача оценки огнестойкости») появляются четыре параметра, зависящие от вида бетона. Их число можно уменьшить до двух, переходя к приведенному времени. Зависимость теплофизических свойств от температуры усложняет построение приближенных решений задачи теплопроводности.

На практике нередко бывает так, что единственным достоверно известным параметром бетона является его удельная плотность  $\rho$ . Даже для конструкций, уже находящихся в эксплуатации, значение плотности  $\rho$  можно получить без дорогостоящих тепловых испытаний. Поэтому было бы удобно иметь формулы, которые, с одной стороны, учитывают характерное изменение параметров  $c$  и  $k$  с изменением температуры, а с другой стороны, привязаны к наиболее «осязаемой» характеристике бетона — его плотности.

В данной работе авторы предлагают новые универсальные (для разных типов бетона) аппроксимации зависимостей  $c(T)$  и  $k(T)$ . Эти аппроксимации позволяют вести расчет температурных полей в условиях минимальной информации о теплофизических свойствах конкретного бетона. В этом заключается новизна публикуемых результатов.

Предлагаемые аппроксимации построены путем анализа большого объема экспериментальных и теоретических сведений о бетонах, которые можно найти в отечественной и иностранной литературе.

Простая структура аппроксимаций  $c(T)$  и  $k(T)$  дает возможность надеяться, что можно построить достаточно простые приближенные формулы для решения нелинейной задачи (2), аналогичные предложенным авторами, но более полно учитывающие особенности теплообмена в условиях пожара. Вывод таких формул станет предметом дальнейших исследований.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы для улучшения существующих инженерных подходов к расчетам огнестойкости, а также для создания новых нормативных докумен-

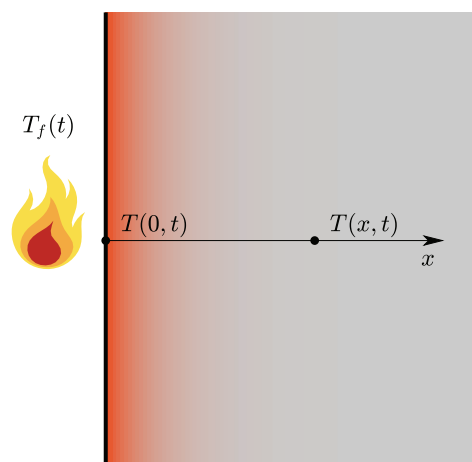


Рис. 1. Задача о нагреве полупространства

Fig. 1. The problem of heating a half-space

тов и стандартов. Практическая значимость работы состоит в возможности применения предлагаемых моделей в реальных проектах, что будет способствовать повышению уровня безопасности строительных конструкций и снижению рисков при возникновении пожаров.

Статья начинается с постановки одномерной нелинейной задачи теплопроводности, чтобы ввести основные обозначения и показать роль зависимостей  $c(T)$  и  $k(T)$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Нелинейная основная тепловая задача оценки огнестойкости*

Как отмечалось в работе [1], одномерная задача теплопроводности для полубесконечного тела является основной модельной задачей при оценке огнестойкости бетонных конструкций. На основе решения одномерной задачи построены известные приближенно-аналитические методы расчета температурных полей как при одностороннем нагреве элементов конструкции, так и при нагреве с двух, трех или четырех сторон<sup>1</sup>, ACI 216.1-07 (TMS-216-07)<sup>3</sup> [2–6].

В публикации [1] приводился простейший вариант одномерной задачи теплопроводности — линейная задача с граничным условием первого рода. В настоящей работе рассмотрим задачу о нагреве полубесконечного тела в условиях стандартного пожара в нелинейной постановке с учетом всех механизмов теплообмена на поверхности.

Напомним, что «стандартным» называется огневое воздействие с изменением температуры  $T_f(t)$

<sup>1</sup> EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design. CEN, Brussels, 2004. P. 97.

<sup>2</sup> СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности : введен 11.06.2020.

<sup>3</sup> ACI 216.1-07 (TMS-216-07). Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. 2007. P. 35.



пламени (flame, fire) по стандартной температурной кривой<sup>1,2</sup>:

$$T_f(t) = T_0 + \Phi_0(t); \quad \Phi_0(t) = 345 \lg(1 + 0,133t), \quad (1)$$

где  $T_0$  — начальная температура конструкции в момент возникновения пожара (в расчетах обычно принимают  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ).

Математическая постановка одномерной задачи о воздействии стандартного пожара на полупространство (рис. 1) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad x \in [0, \infty); \\ -k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha (T_f - T|_{x=0}) + \varepsilon \sigma_0 (T_f^4 - T^4|_{x=0}); \quad (2) \\ T|_{t=0} &= T_0; \quad T \rightarrow T_0, \quad x \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

где  $\rho c(T)$ ,  $k(T)$  — теплофизические параметры материала (плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности);  $T_f$  — температура пламени согласно формуле (1);  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\varepsilon$  — приведенная степень черноты;  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  постоянная Стефана–Больцмана.

Уравнение теплопроводности (2) учитывает изменение теплофизических свойств бетона при повышении температуры. Это изменение может быть существенным в диапазоне температур, характерном для пожаров в зданиях. Следовательно, для решения задачи (2) необходимо знать зависимости  $c(T)$ ,  $k(T)$ . Подробному изучению этих зависимостей авторы посвящают отдельный параграф.

В граничном условии при  $x=0$  учитываются конвективная и лучистая составляющие теплообмена на поверхности. Некоторые авторы отмечают, что температура продуктов сгорания, участвующих в конвективном теплообмене, и равновесная температура излучения пламени, вообще говоря, отличаются [7]. Чтобы учесть это обстоятельство, Викстрем [6] предлагает использовать в качестве  $T_f$  некоторую среднюю «адиабатическую температуру» пожара.

Нелинейная задача (2) не имеет аналитического решения даже в простейшем случае, когда теплофизические параметры постоянны —  $c(T) = c_0$ ,  $k(T) = k_0$ . Далее индексом «0» будем обозначать значения параметров при температуре, равной начальной температуре  $T_0$ .

Стоит отметить, что, несмотря на учет основных физических факторов, нелинейная основная задача остается лишь приближенной моделью реального процесса распространения тепла в условиях пожара. В частности, постановка (2) не учитывает явление массопереноса в теле бетона, изменение оптических свойств поверхности при изменении температуры, изменение интенсивности конвекции в ходе пожара. Эти и другие факторы невозможно учесть в рамках приближенно-аналитического под-

хода. Более того, даже при численном моделировании они, как правило, не принимаются во внимание. В качестве примера работы, где принимается во внимание перенос влаги в процессе нагрева, можно привести статью [8]. Несмотря на наличие подобных публикаций, авторы трудов [9, 10] подчеркивают, что в настоящее время не существует способа удовлетворительного учета влияния массопереноса на процессы теплопроводности в условиях пожара.

Прежде чем переходить к исследованию зависимостей  $c(T)$  и  $k(T)$  удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры, приведем небольшой обзор литературы, посвященной теплофизическим свойствам бетонов.

#### *Теплофизические свойства бетонов в условиях пожара*

Для достоверного описания температурных полей в бетонных конструкциях необходимо учитывать изменения свойств бетона при повышении температуры в условиях огневого воздействия. Бетон — материал со сложным составом и высокой степенью неоднородности. Его физические свойства зависят от множества факторов: химического состава связующего, типа и фракционного состава наполнителя, водоцементного соотношения, армирующих материалов и т.д. Поэтому прогнозировать его теплофизические свойства и характер влияния на них повышенной температуры в столь широком диапазоне ее изменения ( $0\text{--}1200^\circ\text{C}$ ) очень сложно. Большинство строительных материалов нестабильны в этом температурном диапазоне и претерпевают различные физико-химические превращения.

Самым надежным способом получения данных о теплофизических свойствах бетона, по-прежнему, остается эксперимент. Хотя имеются и примеры успешного применения аналитических методов.

Приведем краткий обзор литературы, посвященной теплофизическим свойствам бетонов. Работы, относящиеся к этой области, можно условно разделить на несколько групп:

- к первой группе можно отнести исследования, в которых рассматриваются теплофизические свойства бетонов различных типов при нормальных температурных условиях. Свойства бетонов при нормальных температурах нужны, прежде всего, для расчета тепловой эффективности зданий в условиях нормальной эксплуатации. Здесь имеются как экспериментальные работы [11–17], так и общестроительные справочники [18, 19];
- в публикациях второй группы изучаются свойства бетонов при повышенных температурах. Экспериментальные работы в этой области многочисленны и появляются регулярно [20–30]. Соответствующие данные необходимы для оценки стойкости бетонных конструкций к воздействию пожара [20, 22, 24, 25, 29], а также для специальных при-



ложений бетонов: в ядерной энергетике [18, 21, 26, 31–33] и в сравнительно новой сфере — солнечной энергетике для аккумулирования тепла [27, 28]. Отдельно стоит отметить работы, в которых наряду с экспериментальными методами используются аналитические методы оценки теплофизических параметров при повышенных температурах [9, 34–36];

- третью группу составляют многочисленные инженерные руководства по пожарной безопасности [2, 4–6, 9, 10, 37–41]. В этих работах можно найти табличные данные по свойствам бетонов в условиях повышенных температур, а также разнообразные инженерные формулы, аппроксимирующие температурные зависимости  $k(T)$ ,  $c(T)$  для бетонов разных типов;

- четвертая группа источников — это различные государственные и отраслевые стандарты и нормативные документы, например Eurocode 2, СП 468.1325800.2019, ACI 216.1-07 (TMS-216-07), ACI/TMS 122R-14[3]. В этих трудах фиксируются осредненные зависимости для вычисления удельной теплоемкости  $c$  и коэффициента теплопроводности  $k$ , рекомендуемые для инженерных расчетов. Подобные расчетные формулы выводятся путем регрессионного анализа некоторого объема экспериментальных данных. Поскольку новые экспериментальные сведения продолжают появляться регулярно, указанные стандарты время от времени подвергаются ревизии;

- в отдельную группу можно объединить обзорные работы по свойствам бетонов [7, 15, 22, 32, 37, 42–46]. Такие публикации содержат данные из большого количества источников, сводные таблицы, графики и анализ различий и общих тенденций.

Читателю, желающему подробно познакомиться с современным состоянием вопроса, авторы рекомендуют обратить внимание, в первую очередь, на обзоры [15, 32, 45], как на наиболее информативные и актуальные.

В результате изучения перечисленных выше источников авторы собрали большое количество экспериментальных и теоретических сведений о теплофизических свойствах бетонов. Найденные табличные и графические данные были оцифрованы, приведены в единый массив и в таком виде проанализированы.

Отметим, что среди использованных публикаций есть как классические [19, 34, 35, 47, 48], так и современные [10, 16, 17, 28, 29, 41, 44–46].

Перейдем к обсуждению основных закономерностей, которым подчиняются зависимости  $k(T)$  и  $c(T)$  для бетонов различных видов. Покажем, что можно предложить достаточно простые формулы, хорошо отражающие характер этих зависимостей и пригодные как для легких бетонов, так и для бетонов стандартных и тяжелых марок, в том числе армированных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Коэффициент теплопроводности*

Коэффициент теплопроводности  $k$ , Вт/м·К, характеризует способность материала перераспределять тепловую энергию по объему и связывает вектор теплового потока с градиентом поля температуры:

$$q = -k \nabla T.$$

Чем выше коэффициент теплопроводности материала, тем меньше перепады температуры внутри тела.

В стационарном состоянии поле температуры полностью зависит от величины  $k$ , поскольку параметры  $c$  и  $\rho$  входят только в нестационарную (левую) часть уравнения теплопроводности (2). Стационарное решение используется, например, при расчете тепловой эффективности зданий. Для подобного расчета достаточно знать только коэффициенты теплопроводности материалов. Поэтому многие публикации отдельно посвящены определению коэффициента теплопроводности бетонов [11, 14, 15, 17, 28, 45, 47]. Отметим, что тепловые процессы в условиях пожара существенно нестационарны.

Остановимся вначале на теплофизических свойствах бетонов при нормальной температуре.

### *Корреляция $k_0(\rho)$ «коэффициент теплопроводности – плотность бетона»*

Бетон — неоднородный и пористый материал. Пористость бетона зависит от водоцементного соотношения, способа и температуры замешивания, а также других факторов. На одном и том же связующем можно получить бетоны различной пористости (и удельной плотности). Ясно, что коэффициент теплопроводности  $k_0$  бетона при нормальной температуре существенно зависит от его пористости. И действительно, особенно сильная корреляция значения  $k_0$  с удельной плотностью  $\rho$  бетона наблюдается для легких (сильнопористых) бетонов [11, 14, 18, 19].

В то же время бетоны с примерно одинаковой удельной плотностью, но на разных заполнителях могут иметь различные коэффициенты теплопроводности. Стандартные значения для коэффициентов теплопроводности наиболее распространенных заполнителей таковы, Вт/(м·К): базальт — 1,4; мрамор — 2,7; гранит и известняк — 3,1; доломит — 3,6; песчаник — 3,9; кварцит — 4,3 [45].

Тем не менее оказывается, что теплопроводность бетона в большей степени зависит от его плотности, нежели от его состава [33]. Если совместить имеющиеся в литературе экспериментальные значения ( $\rho$ ,  $k_0$ ) на одном графике, то можно увидеть сильную корреляцию этих параметров.

На рис. 2 представлены данные, взятые из источников [11, 13, 15–19, 21–23, 28, 34, 49], — всего около 270 экспериментальных точек (без дубликатов). Как видно из графика, для легких бетонов ( $\rho < 1500$  кг/м<sup>3</sup>) «кучность» экспериментальных

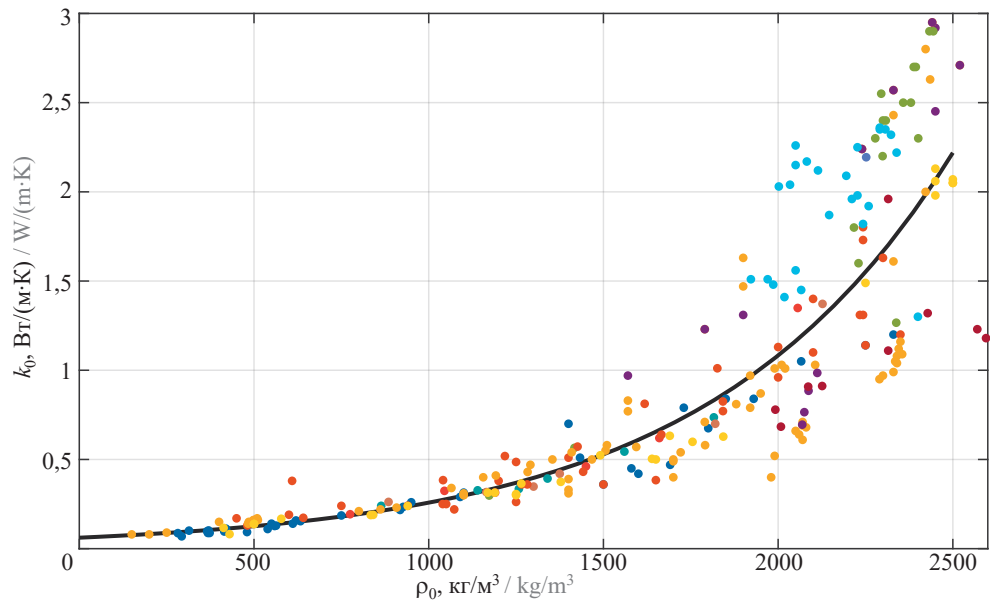


Рис. 2. Зависимость теплопроводности  $k_0$  бетона от его плотности

Fig. 2. The dependence of the thermal conductivity  $k_0$  of concrete on its density

данных вблизи кривой регрессии выше, чем для бетонов высокой плотности.

Еще в середине прошлого века для аппроксимации зависимости  $(\rho, k_0)$  было предложено использовать экспоненциальную формулу вида  $k_0 = \alpha \exp(b\rho)$  (Jacob curve — кривая Джейкоба) [11]. В дальнейшем появилось несколько вариантов таких аппроксимаций с различными значениями коэффициентов  $\alpha$  и  $b$ . Например, в ACI/TMS 122R14 рекомендуется рассчитывать теплопроводность стандартных бетонов ( $\rho \in [1280, 2240]$  кг/м<sup>3</sup>) при нормальной влажности по экспоненциальной формуле:

$$k_0 = 0,087 \exp(1,25\rho/1000),$$

тогда как ACI 216.1-07 (TMS-216-07) предлагает в отсутствие достоверных данных о теплофизических свойствах бетона использовать немного другое значение коэффициента  $\alpha$ :  $\alpha = 0,072$ . Иногда коэффициенты  $\alpha$  и  $b$  определяют отдельно для бетонов разных классов. Подробный обзор существующих вариантов можно найти в публикациях [15, 45]. По мнению авторов настоящего исследования, применять экспоненциальную аппроксимацию имеет смысл только как универсальную: для отдельных классов бетонов вполне достаточно линейной регрессии.

По данным рис. 2 также определили при помощи методов наименьших квадратов (МНК) оптимальные значения коэффициентов (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,933$ ). Полному набору экспериментальных данных лучше всего соответствует функция:

$$k_0 = 0,0614 \exp(1,435\rho/1000), \tag{3}$$

график которой представлен на рисунке. Заметим, что для зависимости из стандарта ACI 216.1-07

(TMS-216-07) коэффициент детерминации на рассматриваемом массиве данных составляет  $R^2 = 0,899$ .

В ходе анализа массива сведений было сделано следующее наблюдение. Если взять результаты экспериментов, в которых определялся не только коэффициент теплопроводности  $k_0$ , но и удельная теплоемкость  $c_0$ , то оказывается, что коэффициент корреляции для зависимости  $k_0(c_0\rho)$  заметно выше, чем для зависимости  $k_0(\rho)$  ( $R^2 = 0,952$  и  $R^2 = 0,938$ ), особенно в области, соответствующей бетонам нормальной плотности. Графически это выражается в том, что пары значений  $(\rho, k_0/c_0)$  кучнее расположены возле кривой регрессии, чем пары  $(\rho, k_0)$ . Это иллюстрирует рис. 3.

Рис. 3 построен авторами по данным из источников [13, 16, 19, 22–34] — всего примерно 130 точек.

Методом наименьших квадратов построена экспоненциальная аппроксимация:

$$k_0/c_0 = 6,55 \cdot 10^{-5} \exp(1,53\rho/1000). \tag{4}$$

В условиях отсутствия экспериментальных данных рекомендуем использовать именно эту зависимость для оценки теплофизических параметров бетонов любых типов, поскольку с ее помощью можно сразу (не обращаясь к данным по теплоемкости) рассчитать температуропроводность бетона при нормальных условиях:

$$\alpha_0 = \frac{k_0}{c_0\rho} = \frac{6,55 \cdot 10^{-5}}{\rho} \exp(1,53\rho/1000).$$

Отметим, что в отечественной литературе можно встретить ряд формул, отличных по виду от выражения (3), описывающих связь плотности и теплопроводности. Сводку таких зависимостей возможно найти в книге [50]. В качестве примера приведем

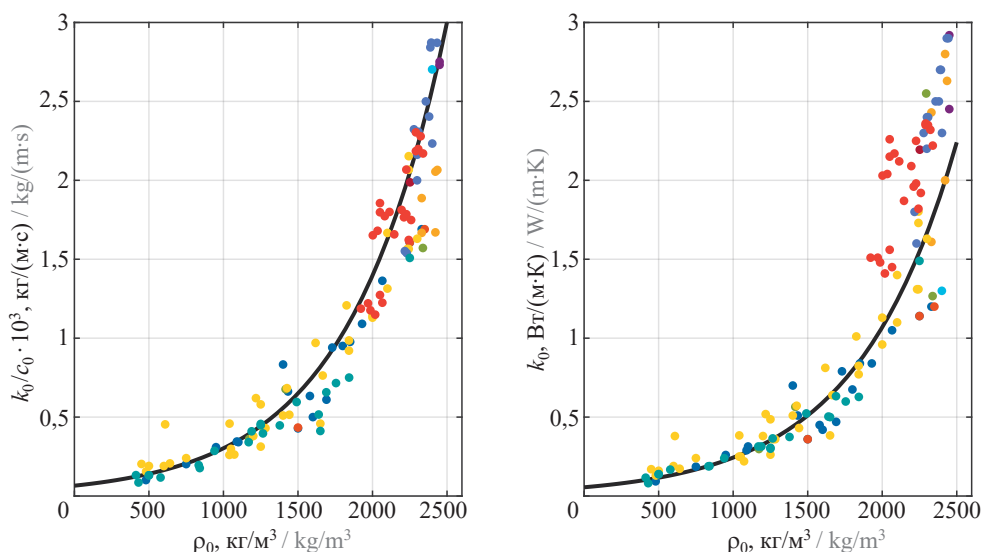


Рис. 3. Кривые регрессии  $\rho \rightarrow k_0/c_0$  и  $\rho \rightarrow k_0$

Fig. 3. Regression curves  $\rho \rightarrow k_0/c_0$  and  $\rho \rightarrow k_0$

эмпирическую формулу Некрасова для пористых и сыпучих материалов:

$$k_0 = 1,16\sqrt{0,02 + 0,22(\rho/1000)^2} - 0,16.$$

Для легких бетонов она дает значения  $k_0$ , не слишком сильно отличающиеся от полученных по формуле (3).

#### Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

С точки зрения решения задачи (2) более важной является зависимость  $k(T)$  коэффициента теплопроводности от температуры. Изучению этой зависимости посвящены работы [9, 21–29, 32–35, 37, 43–46, 49].

Известно, что для большинства однородных материалов, таких как воздух, вода, керамика, сталь, коэффициент теплопроводности  $k$  увеличивается с ростом температуры. Однако для бетонов тенденция к незначительному возрастанию наблюдается только при температурах ниже 100 °С [26, 32, 51]. Этот начальный участок кривой  $k(T)$  мало влияет на поле температуры при пожаре, поэтому он не принимается во внимание ни в одной из известных моделей теплопроводности бетона.

При дальнейшем увеличении температуры начинает играть роль структурная неоднородность бетона. Многочисленные эксперименты по изучению влияния температуры на теплофизические свойства бетона показывают общую для бетонов всех типов тенденцию к снижению коэффициента теплопроводности с ростом температуры. Указанную тенденцию можно объяснить следующими причинами.

Заполнитель и цементный камень по-разному реагируют на повышение температуры. Как правило, цементный камень имеет тенденцию к усадке при возрастании температуры, в то время как заполнители, наоборот, расширяются [51].

Кроме того, в зоне «температурного фронта» из-за высоких градиентов температуры возникают значительные температурные напряжения. Внутренние напряжения вызывают образование микротрещин, что, в свою очередь, препятствует распространению тепла (уменьшается теплопроводность). Еще одним фактором, способствующим снижению теплопроводности бетона при повышении температуры, является высвобождение воды в результате термических реакций в связующем. Дегидратация цементного камня с последующим выпариванием свободной воды приводит к некоторому снижению удельной плотности бетона и, как следствие, к некоторому увеличению его пористости. Давление водяных паров в порах также способствует распространению микротрещин.

Измерения теплопроводности бетона, охлажденного после нагрева до высоких температур, показывают, что исходная теплопроводность материала уже не восстанавливается [30, 32]. Это говорит о том, что снижение коэффициента теплопроводности с увеличением температуры действительно связано с необратимыми процессами, такими как дегидратация и образование микротрещин.

Важно отметить, что описанные механизмы тем заметнее, чем выше плотность бетона. Поэтому особенно заметное снижение теплопроводности характерно для тяжелых бетонов. В особо легких бетонах может наблюдаться даже некоторое увеличение коэффициента теплопроводности с ростом температуры (рис. 4). Таким образом, в бетонах с изначально высокой пористостью эффект роста теплопроводности для однородных материалов и эффект снижения теплопроводности, обусловленный структурной неоднородностью, конкурируют между собой.

На рис. 4 представлены данные о зависимости  $k(T)$  для бетонов разных типов, взятые из источ-

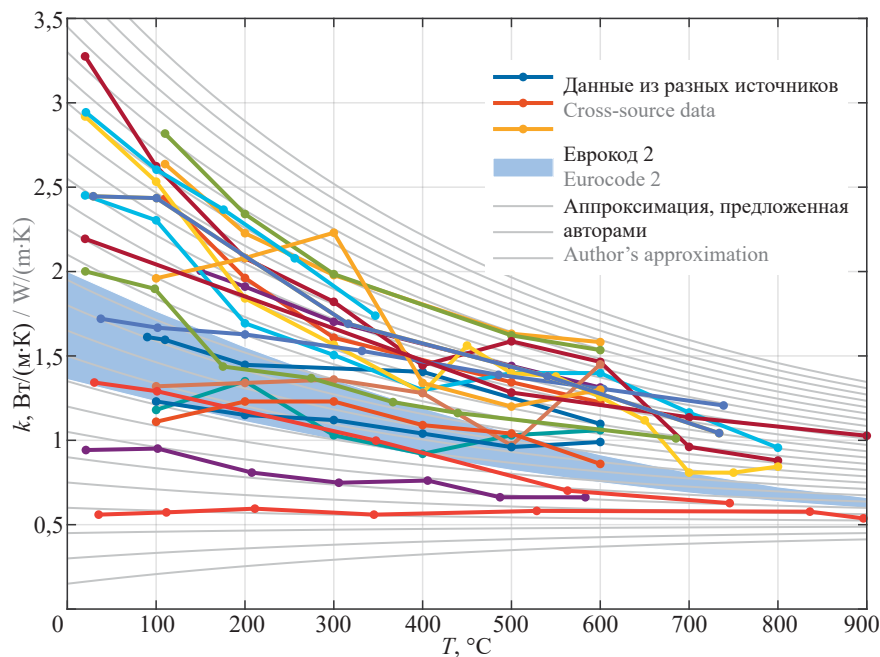


Рис. 4. Зависимость  $k(T)$  теплопроводности от температуры для бетонов разных типов и ее аппроксимация  
Fig. 4. The dependence of thermal conductivity  $k(T)$  on temperature for different types of concrete and its approximation

ников [9, 20–23, 25–28, 30, 32, 34, 35]. Цветовой заливкой выделен коридор значений, которые стандарт Eurocode 2 рекомендует для оценки теплопроводности нормальных бетонов. Границы коридора задаются формулами (температура  $T$  измеряется в  $^{\circ}\text{C}$ ):

$$k_{up}(T) = 2 - 2,451\left(\frac{T}{1000}\right) + 1,07\left(\frac{T}{1000}\right)^2;$$
$$k_{down}(T) = 1,36 - 1,36\left(\frac{T}{1000}\right) + 0,57(T/1000)^2.$$

Заметим, что в новой редакции Eurocode 2 от 2023 года<sup>4</sup> предлагается использовать в расчетах «смешанную» зависимость:

$$k(T) = \begin{cases} k_{up}(T), & T < 140^{\circ}\text{C}, \\ k_{down}(T), & T > 160^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

Примеры использования этого нового подхода можно найти в труде [52].

Главное наблюдение, которое можно сделать, анализируя рис. 4, состоит в следующем.

Вид кривой  $k(T)$  существенным образом зависит от значения  $k_0$  коэффициента теплопроводности при нормальной температуре. Можно считать, что кривые на рис. 4 образуют однопараметрическое семейство  $k(k_0, T)$ .

Указанная тенденция отмечается многими авторами. В обзоре [32] указывается, что, согласно результатам Бранделла (Brundell), температурная зависимость  $k(T)/k_0$  примерно одинакова для разных типов бетонов (сравнивались бетоны с гранитным, извест-

няковым, кварцитным и другими заполнителями). В работе [28] собраны данные из разных источников по теплопроводности стандартных заполнителей — карбонатного, силикатного и базальтового. Для всех заполнителей кривые также почти образуют однопараметрическое семейство. Той же тенденции следует и «коридор» Eurocode 2. В диссертации [53] также обработаны сведения о теплопроводности из нескольких источников и построены верхняя и нижняя границы диапазона изменения теплопроводности нормальных бетонов. Полученные зависимости несколько отличаются от зависимостей Eurocode 2, но имеют тот же характер изменения с ростом температуры. Наконец, систематические теоретические и экспериментальные исследования Хармати [20, 34] дают для нормальных бетонов и легких бетонов границы диапазонов  $k(T)$  с тем же характером изменения.

Из рис. 4 можно увидеть также еще одну общую тенденцию: чем больше значение  $k$ , тем больше скорость его уменьшения с ростом  $T$  ( $dk/dT \sim k$ ). Это подсказывает, что для описания зависимости  $k(T)$  можно использовать экспоненциальную формулу с асимптотическим стремлением  $k$  к некоторому предельному значению, зависящему от начальной теплопроводности  $k_0$ .

Для построения такой аппроксимации авторы настоящего исследования использовали экспериментальные данные рис. 4 из указанных выше источников, а также имеющиеся в литературе обобщающие зависимости типа Eurocode 2. Подобные зависимости можно найти, например, в Eurocode 2, СП 468.1325800.2019 [3, 24, 32, 42]. Всего рассматривалось примерно 40 экспериментальных и аппроксимационных кривых.

<sup>4</sup> EN 1992-1-2:2023. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design. CEN, Brussels, 2023. P. 88.



Аппроксимацию зависимости  $k(T)$  искали в виде:

$$k(T) = \alpha + \beta k_0 + ((1 - \beta)k_0 - \alpha) \exp(-\gamma T).$$

Согласно этому выражению, получаем  $k(0) = k_0$  и  $\lim_{T \rightarrow \infty} k(T) = \alpha + \beta k_0$ . Таким образом, предельное значение мы считаем зависящим от  $k_0$  линейно.

Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  аппроксимации были вычислены МНК, исходя из условия наилучшего совпадения по всему массиву данных. В результате получена следующая формула:

$$k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45)\exp(-2T/1000). \quad (5)$$

На рис. 4 соответствующие кривые семейства  $k(k_0, T)$  показаны светло-серыми линиями.

Наряду с МНК использовали также метод минимизации максимальной относительной погрешности. При этом получается немного другая формула:

$$k(T) = 0,3 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,3)\exp(-2T/1000). \quad (6)$$

Для аппроксимации (6) максимальная относительная погрешность по всему массиву данных составляет 35 %, что можно считать очень хорошим результатом.

Важным достоинством формулы (5) является ее универсальность: она описывает зависимость  $k(T)$  для бетона любого типа при условии, что известен его коэффициент теплопроводности при нормальных условиях  $k_0$ . Если известна только удельная плотность  $\rho$  бетона, то приближенное значение  $k_0$  можно принять согласно формуле (3).

В заключение этого раздела скажем несколько слов еще об одном факторе, влияющем на теплопроводность бетона — об эксплуатационной влажности.

Теплопроводность воды примерно в 30 раз выше теплопроводности воздуха и примерно в три раза ниже теплопроводности сухого бетона. При заполнении пор и микротрещин влагой теплопроводность бетона несколько возрастает. Для нормальных и тяжелых бетонов эта зависимость довольно незначительная [22]. Однако для сильнопористых (легких) бетонов изменение может быть значительным — до двух раз. В обзоре [15] указывается, что в среднем значение  $k$  увеличивается примерно на 6 % при добавлении 1 % влаги по массе (количество влаги, которое может содержать бетон, зависит, прежде всего, от его пористости).

Отметим, что в условиях пожара определяющее влияние на поток тепла, а значит и на скорость прогрева бетона, оказывает теплопроводность приповерхностных слоев, из которых влага быстро испаряется, а коэффициент теплопроводности становится равным коэффициенту теплопроводности сухого бетона. Поэтому влиянием влажности на значение  $k$  в расчетах огнестойкости можно пренебречь.

Перейдем к обсуждению второго теплофизического параметра бетона — его удельной теплоемкости.

Удельная теплоемкость и ее зависимость от температуры

Удельная теплоемкость  $c$ , Дж/(кг·К), характеризует способность материала аккумулировать тепло и определяет динамику изменения температуры в нестационарных процессах. Чем больше удельная теплоемкость материала (а точнее, произведение  $c\rho$ ), тем медленнее будет расти температура конструкции в условиях пожара.

Различные материалы, применяемые в качестве наполнителей в бетонах, имеют близкие значения удельной теплоемкости [20, 22, 26, 32]. Поэтому от вида и массовой доли заполнителя удельная теплоемкость бетона зависит довольно слабо, в отличие от коэффициента теплопроводности  $k$ . *Водоцементное соотношение*  $\omega$  также не оказывает существенного влияния, поскольку вода, не израсходованная на гидратацию цемента, испаряется при высыхании бетона.

Как показывают эксперименты и аналитические расчеты, удельная плотность и пористость бетона тоже не являются определяющим фактором: килограмм пористого и килограмм плотного бетона обладают близкими теплоемкостями.

Однако некоторая корреляция между плотностью и удельной теплоемкостью все же имеется [13].

Европейский стандарт Eurocode 2 и американский стандарт ACI-122<sup>5</sup> рекомендуют удельную  $c_0$  теплоемкость при нормальных условиях считать независимой от удельной плотности и принимать:

$$c_0 = 880 + 900 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Российский стандарт СП 468.1325800.2019 дает несколько меньшие значения —  $c_0 = 750 - 850$  Дж/(кг·К).

Как и коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость меняется при изменении температуры. Однако тип и состав бетона не так существенно влияют на зависимость  $c(T)$ , как на зависимость  $k(T)$ . Это можно видеть, сравнивая рис. 5 и 4. В целом наблюдается тенденция возрастания удельной теплоемкости с ростом температуры.

На рис. 5 собраны экспериментальные данные о зависимости  $c(T)$  из источников [20–23, 26, 27, 35] — всего 29 кривых для бетонов разного состава и разной удельной плотности в диапазоне от 1000 до 2500 кг/м<sup>3</sup>.

Вид экспериментальных кривых рис. 5 показывает, что нет надежных оснований использовать для  $c(T)$  аппроксимации сложнее, чем линейная. В большинстве стандартов и расчетных моделей используется именно *линейная аппроксимация* (об аппроксимации Eurocode 2 будет сказано далее отдельно):

$$c(T) = c_0 + \alpha T. \quad (7)$$

<sup>5</sup> ACI/TMS 122R-14. Guide to thermal properties of concrete and masonry systems. U.S. : ACI, 2014. P. 36.



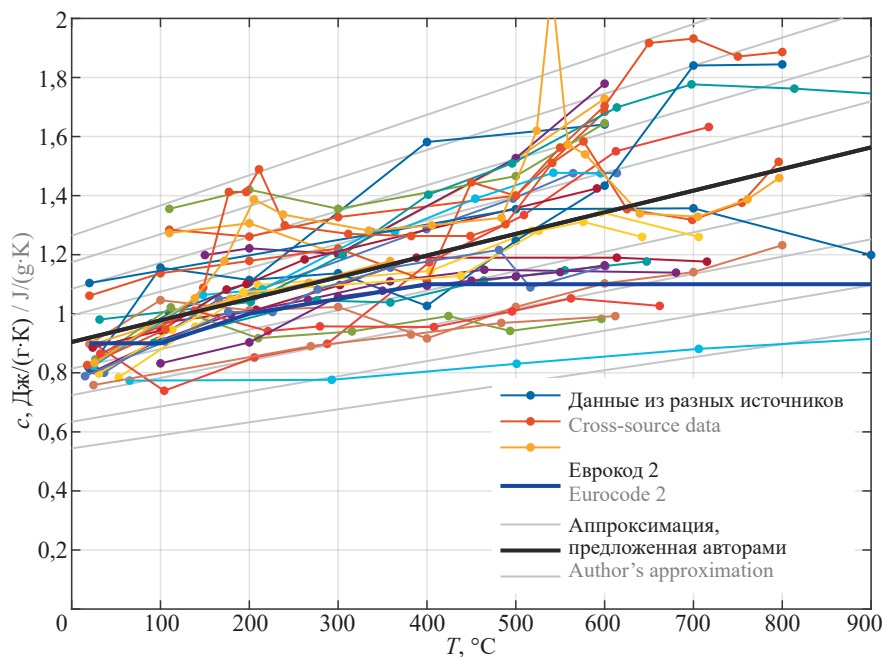


Рис. 5. Зависимость  $c(T)$  удельной теплоемкости от температуры для бетонов разных типов и ее аппроксимация  
Fig. 5. The dependence of specific heat capacity  $c(T)$  on temperature for different types of concrete and its approximation

Например, в СП 468.1325800.2019 для нормальных и тяжелых бетонов принимается зависимость  $c(T) = 0,71 + 0,83(T/1000)$ .

Отметим общие тенденции изменения удельной теплоемкости, которые можно увидеть на рис. 5.

Теплоемкость бетонов всех типов увеличивается с ростом температуры. Экспериментальные кривые имеют близкие коэффициенты наклона, при этом можно отметить некоторое увеличение разброса значений при повышении температуры.

Учитывая сказанное, возможно предложить следующий вариант универсальной линейной аппроксимации:

$$c(T) = c_0(1 + \alpha T); \alpha = \text{const.} \tag{8}$$

При помощи МНК определили значение  $\alpha$ , обеспечивающее наилучшее согласие аппроксимации (8) с массивом данных рис. 5:  $\alpha = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Среднее значение  $c_0$  равно  $c_0 = 904 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , что согласуется со стандартами [22, 24]. Коэффициент детерминации на всем массиве данных составляет  $R^2 = 0,859$ .

При использовании для каждой кривой рис. 5 индивидуальной линейной аппроксимации  $c_i(T) = c_{0i} + \alpha_i T$  коэффициент детерминации на всем массиве данных получается равным  $R^2 = 0,906$ , а при использовании универсальной аппроксимации (7) ( $\alpha = \text{const}$ ) имеем  $R^2 = 0,840$ . Это говорит о том, что универсальная аппроксимация (8) лучше отражает свойства данных рис. 5, чем аппроксимация (7). При этом она обеспечивает среднеквадратическое отклонение, близкое к минимально возможному (при индивидуальной линейной аппроксимации).

На рис. 5 черная жирная прямая соответствует осредненной аппроксимации:

$$c(T) = 900(1 + 0,81(T/100)),$$

серые прямые — это линии из семейства (8) при  $c_0 \in [500, 1250] \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Также на рис. 5 представлена кусочно-линейная аппроксимация Eurocode 2 — синяя ломаная. Видно, что формула Eurocode дает значения удельной теплоемкости несколько ниже средних по рассматриваемому массиву данных. Этот факт отмечают и другие авторы, в частности авторы работ [26, 49].

Рис. 6 показывает, насколько универсальная аппроксимация (8) лучше, чем просто осредненная по всем данным рис. 5 линейная зависимость. Кривые на рис. 6 — это нормализованные данные рис. 5. Для каждой кривой  $c_i(T)$  при помощи МНК найдено значение коэффициента  $c_{0i}$ :  $c_i(T) \approx c_{0i}(1 + 0,81(T/1000))$ .

Кривые  $c_i/c_{0i}$  сравниваются на рис. 6 с единой нормализованной зависимостью  $c/c_0 = 1 + 0,81 \times T/1000$  (жирная черная прямая).

Итак, при известном значении  $c_0$  зависимость  $c(T)$  аппроксимируется единой для бетонов всех типов формулой:

$$c(T) = c_0(1 + 0,81(T/1000)). \tag{9}$$

Если значение  $c_0$  неизвестно, то следует принимать  $c_0 = 900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Укажем на важное преимущество аппроксимации (9) перед аппроксимацией (6) (с единым коэффициентом наклона). Пусть  $\rho$ ,  $k_0$  и  $c_0$  — теплофизические характеристики бетона при нормальной температуре. Введем приведенное время ( $a_0$  — температуропроводность бетона при нормальных условиях):

$$\tau = \frac{k_0}{\rho c_0} t = a_0 t.$$

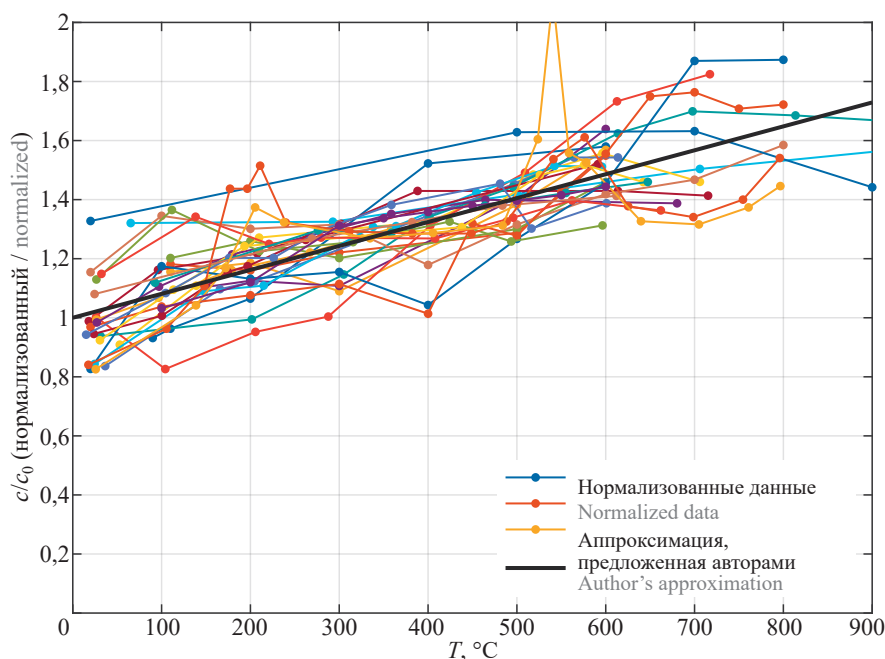


Рис. 6. Нормализованные кривые  $c(T)/c_0$  и аппроксимация

Fig. 6. Normalized curves  $c(T)/c_0$  and their approximation

Тогда уравнение теплопроводности (2) принимает вид:

$$k_0(1 + \alpha T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где  $\alpha = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;  $k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45)\exp(-2T/1000)$ .

В этом уравнении остается только один параметр, зависящий от свойств бетона — коэффициент  $k_0$ . Это упрощение может играть важную роль при исследовании нелинейной задачи (2). Легко понять, что при использовании аппроксимации (6) такое упрощение уже не имеет места.

#### Влияние влагосодержания и реакций разложения

При нагревании бетона до высоких температур происходит ряд необратимых эндотермических процессов, в результате которых изменяются теплофизические характеристики [21, 26, 29, 32, 34, 42, 52, 54]. Наиболее важными из них являются следующие:

- испарение свободной влаги, содержащейся в порах, при  $T \in [100, 130] \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- дегидратация цементного камня с последующим испарением при  $T \in [150, 400] \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- разложение гидроксида кальция  $\text{Ca(OH)}_2$  на оксид и воду при  $T \in [450, 600] \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для бетонов с известняковым заполнителем — декарбонизация известняка при  $T \in [600, 800] \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для керамзитобетонов — разложение керамзита при  $T > 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Более полный список термохимических реакций при нагреве бетона приводится в публикациях [32, 54].

Следует отметить, что подобные процессы конечны во времени. Например, если поддерживать

температуру бетона равной  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$  в течение некоторого времени, то влага в порах полностью испарится (процесс завершится) и далее теплофизические свойства будут соответствовать сухому бетону.

Поэтому пики на приводимых графиках эффективной теплоемкости (рис. 7) соответствуют конкретному режиму нестационарного нагрева образцов.

В процессе быстрого нагрева бетона на эндотермические процессы расходуется некоторое количество теплоты, в результате чего несколько замедляется рост температуры. Чтобы учесть этот эффект, оставаясь при этом в рамках модели теплопроводности (2) (без добавления уравнений массопереноса), можно ввести *эффективную удельную теплоемкость*, которая в соответствующем диапазоне температур будет выше, чем теплоемкость при тех же температурах, но в квазистационарном процессе нагрева. В результате на графиках  $c(T)$  появляются упомянутые выше пики.

На рис. 7, а приведены кривые эффективной теплоемкости  $c(T)$ , рассчитанные теоретически для легких и тяжелых бетонов в работе [55] (синие кривые), а также кривые, полученные в эксперименте [38] для тяжелых бетонов с силикатным и карбонатным заполнителями (красные кривые). Графики на рис. 7, а соответствуют сухому бетону, поэтому заметными являются только пики при температурах разложения гидроксида кальция.

Стандарт Eurocode 2 предлагает модель зависимости  $c(T)$ , учитывающую исходное влагосодержание  $\varphi$  бетона. «Зуб» на синей ломаной (рис. 7, б) соответствует бетону высокой начальной влажности  $\varphi = 0,04$  (4 % воды по массе).

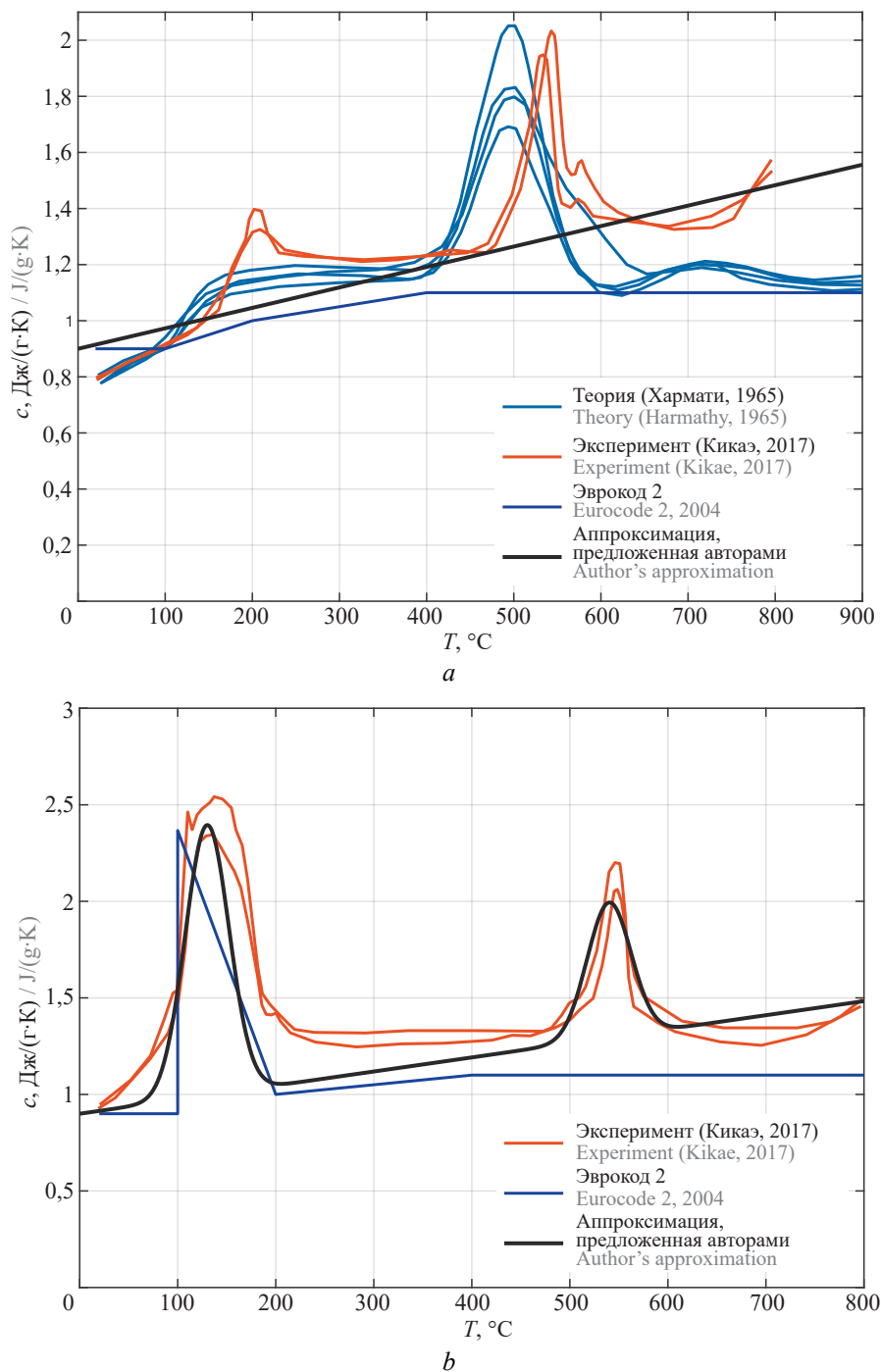


Рис. 7. Кривые эффективной теплоемкости  $c(T)$   
Fig. 7. Effective specific heat capacity  $c(T)$  curves

Аналогичный пик имеется и на экспериментальных кривых [26], и на теоретических кривых [55].

Черной жирной кривой изображена предложенная выше линейная аппроксимация (9), к которой добавлены «пиковые» поправки гауссовского типа:

$$c(T) = c_0(1 + \alpha T) + 0,35\varphi \exp(-0,001(T - 130)^2) + 0,7\exp(-0,001(T - 540)^2). \tag{10}$$

В заключение сделаем важное замечание.

Эндотермические процессы в бетоне забирают часть тепловой энергии, увеличивая эффективную теплоемкость материала и тем самым замедляя прогрев. При оценивании огнестойкости конструкции следует исходить из наихудшего сценария, а значит, разумно вести расчет для сухого бетона без учета реакций разложения.

*Зависимость  $\rho(T)$  удельной плотности от температуры*

В температурных условиях пожара изменяются не только коэффициент теплопроводности  $k$  и удель-

ная теплоемкость  $c$ , но также и удельная плотность  $\rho$  бетона. Вследствие процессов дегидратации, разложения  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и декарбонизации известняка возрастает пористость бетона и, соответственно, уменьшается его удельная плотность [21, 24, 29, 32, 34, 52, 54, 56, 57].

Большинство авторов отмечают, что процессы дегидратации и разложения гидроксида кальция слабо влияют на удельную плотность при температурах до 600 °С. В экспериментах [21] зафиксировано монотонное снижение плотности тяжелого бетона: в диапазоне  $T \in [20, 1200]$  °С потеря массы составляет менее 10 %. Такой же по величине эффект дает и аппроксимация Eurocode 2.

Наибольшее изменение удельной плотности происходит у бетонов на известняковом заполнителе при температуре  $T > 600$  °С вследствие декарбонизации известняка [24, 32, 52, 54], а также у керамзитобетонов при  $T > 800$  °С ввиду диссоциации керамзита [29]. Согласно данным исследования [24], бетоны на известняковых заполнителях могут терять до 25 % массы при нагреве до температур порядка 800 °С.

Несмотря на то что эффект снижения удельной плотности бетонов вполне реален, в модели теплопроводности (2) его можно напрямую не учитывать.

Дело в том, что в уравнение теплопроводности (2) удельная плотность и теплоемкость входят в виде произведения  $\rho c$ . Поэтому изменение плотности влияет на процесс теплопроводности ровно так же, как и изменение теплоемкости. Однако относительная погрешность, с которой обычно известна зависимость  $c(T)$ , сравнима с величиной относительного изменения  $\rho(T)$  или даже превосходит ее. Отметим также, что всякий эндотермический процесс, сопровождающийся уменьшением удельной плотности, одновременно увеличивает эффективную теплоемкость материала, и в произведении  $\rho c$  эти эффекты отчасти компенсируют друг друга.

Поэтому допустимо считать, что  $\rho = \text{const}$  в процессе нагрева бетона, а некоторое изменение удельной плотности учитывается в зависимости  $c(T)$  вида (9).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены закономерности изменения теплофизических параметров бетона при изменении температуры. Обобщены и проанализированы данные о теплофизических свойствах бетонов, которые можно найти в отечественной и иностранной литературе, в том числе в публикациях последних лет. Обработка большого объема экспериментальных и теоретических данных о свойствах бетонов позволила предложить новые универсальные формулы для оценки удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности бетонов различных типов при температурах, характерных для огневого воздействия.

Приведем сводку полученных формул.

Для зависимости  $k_0(\rho)$  коэффициента теплопроводности при нормальных условиях от плотности бетона получена аппроксимация:

$$k_0 = 0,0614 \exp(1,435\rho/1000). \quad (\text{A})$$

Для зависимости  $k(T)$  коэффициента теплопроводности от температуры получена универсальная формула, в которой параметром является значение  $k_0$  — коэффициент теплопроводности при нормальной температуре:

$$k(T) = 0,45 + 0,1k_0 + (0,9k_0 - 0,45)\exp(-2T/1000). \quad (\text{B})$$

Если теплопроводность бетона неизвестна, то ее следует оценивать по предыдущей формуле (A).

Для зависимости  $c(T)$  удельной теплоемкости от температуры получена универсальная аппроксимация:

$$c(T) = c_0(1 + 0,81(T/1000)), \quad (\text{C})$$

где  $c_0$  — удельная теплоемкость при нормальной температуре. Если значение  $c_0$  неизвестно, то следует принимать  $c_0 = 900$  Дж/(кг·К).

В условиях, когда о теплофизических параметрах бетона нет никакой информации, вместо формулы (A) лучше применять формулу:

$$\frac{k_0}{c_0} = 6,55 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{1,53\rho}{1000}\right), \quad (\text{D})$$

поскольку, как показано выше, отношение  $k_0/c_0$  аппроксимируется с более высокой точностью, чем параметры  $k_0$  и  $c_0$  по отдельности. Можно также сразу рассчитывать температуропроводность  $a_0$  бетона при нормальной температуре по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{k_0}{c_0\rho} = \frac{6,55 \cdot 10^{-5}}{\rho} \exp(1,53\rho/1000). \quad (\text{E})$$

Важно отметить, что при использовании этих формул уравнение нелинейной теплопроводности удается привести к виду, зависящему всего от одного параметра — коэффициента теплопроводности бетона при нормальной температуре  $k_0$ .

Разработанные аппроксимационные модели позволяют более точно прогнозировать поведение бетона при воздействии высоких температур, что имеет важное практическое значение для проектирования огнестойких конструкций. Полученные зависимости могут быть использованы в инженерных расчетах и нормативных документах, а также для создания новых стандартов и методик оценки огнестойкости.

## Перспективы дальнейших исследований

Несмотря на достигнутые успехи, остаются вопросы, требующие дальнейшего изучения. В частности, следует подробнее изучить влияние влажно-



переноса, а также изменение оптических свойств поверхности бетона при нагреве. Эти факторы могут существенно влиять на процесс теплопередачи и требуют дополнительных исследований с использованием численных методов моделирования.

Таким образом, результаты проведенного исследования представляют собой важный шаг на пути

к созданию более точных и надежных моделей оценки огнестойкости бетонных конструкций. Они могут быть полезны как для научного сообщества, так и для практиков в области строительства и проектирования зданий и сооружений, особенно в таких ответственных отраслях, как ядерная энергетика и гражданское строительство.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г., Мешков В.Р., Геращенко В.С., Гришин А.С. Аппроксимация решения линейной задачи теплопроводности при одностороннем нагреве бетона в условиях стандартного температурного режима пожара // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025. Т. 5. № 1 (111). С. 52–66. DOI: 10.31660/2782-232X-2025-1-52-66. EDN PPUZMN.

2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 142 с.

3. Lie T.T. Structural fire protection. New York : ASCE, 1992. DOI: 10.1061/9780872628885

4. Фёдоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : ACB, 2009. 408 с. EDN QNOAXN.

5. Hurley M.J. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. NY : Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0

6. Wickström U. Temperature calculation in fire safety engineering. Switzerland : Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3

7. Banerjee D.K. A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2021. Vol. 126. DOI: 10.6028/jres.126.30

8. Soares T.R.L., Farage M.C.R., de Souza Bastos F., Renault N. Parametric analysis of concrete response under high temperatures via a thermo-hydric numerical model // *Mecánica Computacional*. 2019. Vol. XXXVII. Pp. 1973–1982.

9. Millard A., Pimienta P. Modelling of concrete behaviour at high temperature // *RILEM State-of-the-Art Reports*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11995-9

10. Kodur V.K.R., Naser M.Z. Structural fire engineering. NY : McGraw-Hill Publication, 2020.

11. Loudon A.G. The thermal properties of lightweight concretes // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1979. Vol. 1. Issue 2. Pp. 71–85. DOI: 10.1016/0262-5075(79)90013-7

12. Kim K.-H., Jeon S.-E., Kim J.-K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. Issue 3. Pp. 363–371. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)00965-1

13. Howlader M.K., Rashid M.H., Mallick D., Haque T. Effects of aggregate types on thermal proper-

ties of concrete // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7. Issue 7. Pp. 900–907.

14. Real S., Bogas J.A., Gomes M., Ferrer B. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2016. Vol. 68. Issue 15. Pp. 798–808. DOI: 10.1680/jmacr.15.00424

15. Asadi I., Shafigh P., Hassan Z.F.B.A., Mahyuddin N.B. Thermal conductivity of concrete : a review // *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. Pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.job.2018.07.002

16. Talebi H.R., Kayan B.A., Asadi I., Hassan Z.F.B.A. Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. Vol. 8. Issue 3. Pp. 908–914.

17. Daza-Badilla L., Gómez R., Díaz-Noriega R., Avudaiappan S., Skrzypkowski K., Saavedra-Flores E.I. et al. Thermal conductivity in concrete samples with natural and synthetic fibers // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 4. P. 817. DOI: 10.3390/ma17040817

18. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М. : Атомиздат, 1968. 484 с.

19. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. 2-е изд. М., 1969. 144 с.

20. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal properties of selected masonry unit concretes // *ACI Journal Proceedings*. 1973. Vol. 70. Issue 2. DOI: 10.14359/11193

21. Shin K.-Y., Kim S.-B., Kim J.-H., Chung M., Jung P.-S. Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures // *Nuclear Engineering and Design*. 2002. Vol. 212. Issue 1–3. Pp. 233–241. DOI: 10.1016/s0029-5493(01)00487-3

22. Jansson R. Measurement of concrete thermal properties at high temperature // *Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Proceedings from the fib Task Group 4.3 workshop*. 2004.

23. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23. Issue 6. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225

24. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures // *ISRN Civil Engineering*. 2014. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2014/468510



25. Голованов В.И., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 5. С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44. EDN ZAFKSB.
26. Kakae N., Miyamoto K., Momma T., Sawada S., Kumagai H., Ohga Y. et al. Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature // Journal of Advanced Concrete Technology. 2017. Vol. 15. Issue 6. Pp. 190–212. DOI: 10.3151/jact.15.190
27. Pan J., Zou R., Jin F. Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage // Energies. 2016. Vol. 10. Issue 1. P. 33. DOI: 10.3390/en10010033
28. Lucio-Martin T., Roig-Flores M., Izquierdo M., Alonso M.C. Thermal conductivity of concrete at high temperatures for thermal energy storage applications: Experimental analysis // Solar Energy. 2021. Vol. 214. Pp. 430–442. DOI: 10.1016/j.solener.2020.12.005
29. Martinez J.E., Rabanal F.P.A., Lazaro M., Alonso-Martinez M., Alvear D., del Coz-Diaz J.J. Assessment of lightweight concrete thermal properties at elevated temperatures // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 21. P. 10023. DOI: 10.3390/app112110023
30. Benjeddou O., Katman H.Y., Jedidi M., Mashaan N. Experimental investigation of the high temperatures effects on self-compacting concrete properties // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 729. DOI: 10.3390/buildings12060729
31. Онуфриев С.В., Петухов В.А. Теплофизические свойства бетонов для АЭС. М. : ОИВТ РАН, 2005. 36 с.
32. Naus D.J. A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures (NUREG/CR-7031). U.S.NRC, 2010.
33. Noh H.G., Lee J.H., Kang H.C., Park H.S. Effective thermal conductivity and diffusivity of containment wall for nuclear power plant OPR1000 // Nuclear Engineering and Technology. 2017. Vol. 49. Issue 3. Pp. 459–465. DOI: 10.1016/j.net.2016.10.010
34. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // Journal of Materials. 1970. Vol. 5. Issue 1. Pp. 47–74.
35. Collet Y. Étude des propriétés du béton soumis à des températures sélevées entre 200 et 900 °C // Annales des Travaux Publics de Belgique. 1977. Issue 4. Pp. 332–338.
36. Khan M.I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models // Building and Environment. 2002. Vol. 37. Issue 6. Pp. 607–614. DOI: 10.1016/s0360-1323(01)00061-0
37. Guo Z., Shi X. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. US : Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/C2010-0-65988-8
38. Варламов А.А. Железобетонные и каменные конструкции: расчет огнестойкости бетонных конструкций : учебное пособие. М. : ACB, 2014. 128 с.
39. Buchanan A.H., Abu A.K. Structural design for fire safety. 2nd ed. UK: Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781118700402
40. Hertz K. Design of fire-resistant concrete structures. London : ICE, 2019. DOI: 10.1680/dofrcs.64447
41. La Malva K., Hopkin D. International handbook of structural fire engineering // The Society of Fire Protection Engineers Series. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77123-2
42. Schneider U. Concrete at high temperatures : a general review // Fire Safety Journal. 1988. Vol. 13. Issue 1. Pp. 55–68. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90033-1
43. Inwood M.J. Properties and characteristics of concrete at elevated temperatures // Concrete '99: Creating in Concrete — Architectural and Engineering Perspective : Proceedings of the Technical Conference and AGM. 1999. Pp. 89–97.
44. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures : a review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 270. P. 121398. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
45. Khushefati W.H., Demirboga R., Farhan K.Z. Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites : a review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. P. 100127. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100127
46. Rao S., Tadepalli T. High-temperature behaviour of concrete : a review // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 167–186. DOI: 10.1007/978-981-99-7464-1\_13
47. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М. : Гос. изд. лит. по строительству и архитектуре, 1955. 155 с.
48. Loudon A.G., Stacey E.F. The thermal and acoustic properties of lightweight concretes // Structural Concrete. 1966. Pp. 58–95.
49. Kizilkanat A.B., Yüzer N., Kabay N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 45. Pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.080
50. Грызлов В.С. Структурный подход в оценке теплопроводности легкого бетона : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2020. 156 с.
51. Diederichs U., Jumppanen U.M., Pentalla V. Behavior of high strength concrete at elevated temperatures. Finland : Helsinki University of Technology, 1989.
52. Zehfuß J., Robert F., Spille J., Razafinjato R.N. Evaluation of Eurocode 2 approaches for thermal conductivity of concrete in case of fire // Civil Engineering Design. 2020. Vol. 2. Issue 3. Pp. 58–71. DOI: 10.1002/cend.202000001

53. *Khaliq W.* Performance characterization of high performance concretes under fire conditions: thesis. Michigan State University, 2012. 345 p.

54. *Schneider U., Diederichs U., Ehm C.* Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's // *Nuclear Engineering and Design*. 1982. Vol. 67. Issue 2. Pp. 245–258. DOI: 10.1016/0029-5493(82)90144-3

55. *Harmathy T.Z.* The effect of moisture on the fire endurance of building elements // *Moisture of Materials in Relation to Fire Tests*, ASTM Special Technical Publication. 1965. Pp. 74–95.

56. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 29–35. EDNTOBVXL.

57. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Comparative Analysis of Analytical and Experimental Results of the Strength of Compressed Reinforced Concrete Columns under Special Combinations of Loads // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 01029. DOI: 10.1051/mateconf/20168601029

Поступила в редакцию 13 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ашот Георгиевич Тамразян** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, член-корреспондент РААСН, заслуженный деятель науки Российской Федерации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

**Вадим Ростиславович Мешков** — кандидат технических наук, доцент Высшей школы теоретической механики и математической физики; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; РИНЦ ID: 11655, Scopus: 17435240500, ORCID: 0009-0009-2088-3932; meshkovadim@yandex.ru;

**Виталий Сергеевич Геращенко** — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный технический эксперт; **Атомэнергопроект**; 105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1; ORCID: 0009-0003-2701-2167; geraschenko\_vs@aep.ru;

**Андрей Сергеевич Гришин** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; начальник научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости; **Атомэнергопроект**; 105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1; ORCID: 0009-0006-3616-0200; grishin\_as@aep.ru.

Вклад авторов:

Тамразян А.Г. — научное сопровождение.

Мешков В.Р. — написание статьи.

Геращенко В.С. — сбор и анализ материалов.

Гришин А.С. — научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Meshkov V.R., Gerashchenko V.S., Grishin A.S. Approximating the solution of a linear heat transfer problem for concrete subjected to one-sided heating under standard fire conditions. *Architecture, Construction, Transport*. 2025; 5(1):(111):52-66. DOI: 10.31660/2782-232X-2025-1-52-66. EDN PPUZMN. (rus.).

2. *Yakovlev A.I.* Calculation of fire resistance of building structures. Moscow, Stroyizdat, 1988; 142. (rus.).

3. *Lie T.T.* Structural fire protection. New York, ASCE, 1992. DOI: 10.1061/9780872628885

4. *Fyodorov V.S., Levitskiy V.E., Molchadskiy I.S., Aleksandrov A.V.* Fire resistance and fire hazard of building structures. Moscow, ASV, 2009; 408. EDN QNOAXN. (rus.).

5. *Hurley M.J.* SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. NY, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0

6. *Wickström U.* Temperature calculation in fire safety engineering. Switzerland, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3

7. *Banerjee D.K.* A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire. *Jour-*

*nal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2021; 126. DOI: 10.6028/jres.126.30

8. Soares T.R.L., Farage M.C.R., de Souza Bastos F., Renault N. Parametric analysis of concrete response under high temperatures via a thermo-hydric numerical model. *Mecánica Computacional*. 2019; XXXVII:1973-1982.

9. Millard A., Pimienta P. Modelling of concrete behaviour at high temperature. *RILEM State-of-the-Art Reports*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11995-9

10. Kodur V.K.R., Naser M.Z. *Structural fire engineering*. NY, McGraw-Hill Publication, 2020.

11. Loudon A.G. The thermal properties of lightweight concretes. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1979; 1(2):71-85. DOI: 10.1016/0262-5075(79)90013-7

12. Kim K.-H., Jeon S.-E., Kim J.-K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(3):363-371. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)00965-1

13. Howlader M.K., Rashid M.H., Mallick D., Haque T. Effects of aggregate types on thermal properties of concrete. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012; 7(7):900-907.

14. Real S., Bogas J.A., Gomes M., Ferrer B. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2016; 68(15):798-808. DOI: 10.1680/jmacr.15.00424

15. Asadi I., Shafagh P., Hassan Z.F.B.A., Mahyuddin N.B. Thermal conductivity of concrete : a review. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20:81-93. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.002

16. Talebi H.R., Kayan B.A., Asadi I., Hassan Z.F.B.A. Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020; 8(3):908-914

17. Daza-Badilla L., Gómez R., Díaz-Noriega R., Avudaippan S., Skrzypkowski K., Saavedra-Flores E.I. et al. Thermal conductivity in concrete samples with natural and synthetic fibers. *Materials*. 2024; 17(4):817. DOI: 10.3390/ma17040817

18. Chirkin V.S. *Thermophysical properties of nuclear engineering materials*. Moscow, Atomizdat, 1968; 484. (rus.).

19. Franchuk A.U. *Tables of thermal performance indicators of building materials*. Moscow, 1969; 144. (rus.).

20. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal properties of selected masonry unit concretes. *ACI Journal Proceedings*. 1973; 70(2). DOI: 10.14359/11193

21. Shin K.-Y., Kim S.-B., Kim J.-H., Chung M., Jung P.-S. Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*. 2002; 212(1-3):233-241. DOI: 10.1016/s0029-5493(01)00487-3

22. Jansson R. Measurement of concrete thermal properties at high temperature. *Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Proceedings from the fib Task Group 4.3 workshop*. 2004.

23. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011; 23(6):793-801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225

24. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. 2014; 1-15. DOI: 10.1155/2014/468510

25. Golovanov V.I., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fiber under standard temperature regimes. *Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(5):37-44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44. EDN ZAFKSB. (rus.).

26. Kakae N., Miyamoto K., Momma T., Sawada S., Kumagai H., Ohga Y. et al. Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017; 15(6):190-212. DOI: 10.3151/jact.15.190

27. Pan J., Zou R., Jin F. Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage. *Energies*. 2016; 10(1):33. DOI: 10.3390/en10010033

28. Lucio-Martin T., Roig-Flores M., Izquierdo M., Alonso M.C. Thermal conductivity of concrete at high temperatures for thermal energy storage applications: Experimental analysis. *Solar Energy*. 2021; 214:430-442. DOI: 10.1016/j.solener.2020.12.005

29. Martinez J.E., Rabanal F.P.A., Lazaro M., Alonso-Martinez M., Alvear D., del Coz-Diaz J.J. Assessment of lightweight concrete thermal properties at elevated temperatures. *Applied Sciences*. 2021; 11(21):10023. DOI: 10.3390/app112110023

30. Benjeddou O., Katman H.Y., Jedidi M., Mashaan N. Experimental investigation of the high temperatures effects on self-compacting concrete properties. *Buildings*. 2022; 12(6):729. DOI: 10.3390/buildings12060729

31. Onufriev S.V., Petukhov V.A. *Thermophysical properties of concretes for nuclear power plants*. Moscow, OIVT RAN, 2005; 36. (rus.).

32. Naus D.J. *A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures (NUREG/CR-7031)*. U.S.NRC, 2010.

33. Noh H.G., Lee J.H., Kang H.C., Park H.S. Effective thermal conductivity and diffusivity of containment wall for nuclear power plant OPR1000. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017; 49(3):459-465. DOI: 10.1016/j.net.2016.10.010



34. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *Journal of Materials*. 1970; 5(1):47-74.
35. Collet Y. Étude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900 °C. *Annales des Travaux Publics de Belgique*. 1977; 4:332-338.
36. Khan M.I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*. 2002; 37(6):607-614. DOI: 10.1016/s0360-1323(01)00061-0
37. Guo Z., Shi X. *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures*. US, Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/C2010-0-65988-8
38. Varlamov A.A. *Reinforced concrete and masonry structures. Fire resistance calculation of concrete structures : textbook*. Moscow, ASV, 2014; 128. (rus.).
39. Buchanan A.H., Abu A.K. *Structural design for fire safety. 2nd ed.* UK, Wiley, 2017. DOI: 10.1002/9781118700402
40. Hertz K. *Design of fire-resistant concrete structures*. London, ICE, 2019. DOI: 10.1680/dofrcs.64447
41. LaMalva K., Hopkin D. International handbook of structural fire engineering. *The Society of Fire Protection Engineers Series*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77123-2
42. Schneider U. Concrete at high temperatures : a general review. *Fire Safety Journal*. 1988; 13(1):55-68. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90033-1
43. Inwood M.J. Properties and characteristics of concrete at elevated temperatures. *Concrete '99: Creating in Concrete — Architectural and Engineering Perspective : Proceedings of the Technical Conference and AGM*. 1999; 89-97.
44. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures : a review. *Construction and Building Materials*. 2020; 270:121398. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
45. Khushefati W.H., Demirboga R., Farhan K.Z. Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites : a review. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100127. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100127
46. Rao S., Tadepalli T. High-temperature behaviour of concrete : a review. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 167-186. DOI: 10.1007/978-981-99-7464-1\_13
47. Kaufman B.N. *Thermal conductivity of building materials*. Moscow, 1955; 155. (rus.).
48. Loudon A.G., Stacey E.F. The thermal and acoustic properties of lightweight concretes. *Structural Concrete*. 1966; 58-95.
49. Kizilkanat A.B., Yüzer N., Kabay N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*. 2013; 45:157-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.080
50. Gryzlov V.S. *A structural approach to assessing the thermal conductivity of lightweight concrete : textbook*. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2020; 156. (rus.).
51. Diederichs U., Jumppanen U.M., Pentalla V. *Behavior of high strength concrete at elevated temperatures*. Finland, Helsinki University of Technology, 1989.
52. Zehfuß J., Robert F., Spille J., Razafinjato R.N. Evaluation of Eurocode 2 approaches for thermal conductivity of concrete in case of fire. *Civil Engineering Design*. 2020; 2(3):58-71. DOI: 10.1002/cend.202000001
53. Khaliq W. *Performance characterization of high performance concretes under fire conditions : thesis*. Michigan State University, 2012; 345.
54. Schneider U., Diederichs U., Ehm C. Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's. *Nuclear Engineering and Design*. 1982; 67(2):245-258. DOI: 10.1016/0029-5493(82)90144-3
55. Harmathy T.Z. The effect of moisture on the fire endurance of building elements. *Moisture of Materials in Relation to Fire Tests, ASTM Special Technical Publication*. 1965; 74-95.
56. Tamrazyan A.G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in conditions of fire effect. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:29-35. EDN TOBVXL. (rus.).
57. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative Analysis of Analytical and Experimental Results of the Strength of Compressed Reinforced Concrete Columns under Special Combinations of Loads. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:01029. DOI: 10.1051/mateconf/20168601029

Received March 13, 2025.

Adopted in revised form on June 19, 2025.

Approved for publication on June 19, 2025.

**B I O N O T E S :** **Ashot G. Tamrazian** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

**Vadim R. Meshkov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; build. B, 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 11655, Scopus: 17435240500, ORCID: 0009-0009-2088-3932; meshkovadim@yandex.ru;

**Vitaliy S. Gerashchenko** — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief technical expert; **Atomenergoproekt**; build. 1, 7 Bakuninskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-2701-2167; geraschenko\_vs@aep.ru;

**Andrei S. Grishin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Research Department of Dynamics and Seismic Resistance; **Atomenergoproekt**; build. 1, 7 Bakuninskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-3616-0200; grishin\_as@aep.ru.

*Contribution of the authors:*

*Ashot G. Tamrazian — scientific support.*

*Vadim R. Meshkov — writing an article.*

*Vitaliy S. Gerashchenko — collection and analysis of materials.*

*Andrei S. Grishin — scientific editing of the article.*

*The authors declare no relevant conflict of interest.*



Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов

Анатолий Леонидович Кришан<sup>1,3</sup>, Владимир Иванович Римшин<sup>2,3</sup>,  
Мария Анатольевна Астафьева<sup>1,3</sup>, Михаил Алексеевич Лихидько<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова);  
г. Магнитогорск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

**Введение.** Все более масштабное применение сжатых трубобетонных элементов (ТБЭ) в практике строительства требует развития методик расчета их прочности, учитывающих основные особенности их силового сопротивления. В действующих нормах проектирования ряда стран предлагаются эмпирические формулы, обеспечивающие хорошую точность расчета центрально сжатых трубобетонных конструкций, но неверно учитывающие распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой. Предложена методика, позволяющая достоверно оценивать напряженное состояние бетона и трубы.

**Материалы и методы.** Прочность коротких центрально сжатых ТБЭ можно определить с помощью метода предельных усилий. Точность расчетов по предложенной методике зависит от правильного установления коэффициентов материала. В настоящее время для трубобетонных колонн, как правило, применяют тяжелый бетон, который имеет плотную структуру. Для таких бетонов предлагается принимать значения, которые получены после обработки результатов опытов, проводившихся при объемном сжатии с постоянным по величине боковым давлением. С целью установления этих значений выполнен статистический анализ результатов 232 опытов с короткими центрально сжатыми ТБЭ из тяжелых бетонов средней и высокой прочности. Для каждого опыта подбирались значения коэффициентов, соответствующие наилучшему совпадению теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок.

**Результаты.** Методики действующих норм не позволяют учесть особенности бетонного ядра в сжатых ТБЭ бетонов различных видов. В предлагаемой методике данный вопрос решается за счет соответствующего подбора коэффициентов материала. При наличии достаточного объема экспериментов с ТБЭ из бетона конкретного вида найти значения соответствующих коэффициентов несложно.

**Выводы.** Разработанная методика расчета прочности коротких центрально сжатых ТБЭ учитывает основные особенности силового сопротивления трубобетонной конструкции и дает возможность определить распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** центрально сжатый трубобетонный элемент, прочность, напряженное состояние, трехосное сжатие, боковое давление, силовое сопротивление, бетонное ядро

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Лихидько М.А. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1154–1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164

Автор, ответственный за переписку: Владимир Иванович Римшин, v.rimshin@niisf.ru.

Strength of centrally compressed concrete tube elements

Anatoly L. Krishan<sup>1,3</sup>, Vladimir I. Rimshin<sup>2,3</sup>, Maria A. Astafieva<sup>1,3</sup>, Mikhail A. Likhidko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University; Magnitogorsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

**Introduction.** The increasingly large-scale use of compressed concrete tube elements in construction practice requires the development of methods for calculating their strength, taking into account the main features of their force resistance. The current design standards of a number of countries offer empirical formulas that ensure good accuracy in calculating axially compressed concrete pipe structures, but incorrectly take into account the distribution of forces between the concrete core and the steel pipe. This paper proposes a method that allows for a reliable assessment of the stress state of concrete and pipe.

**Materials and methods.** The strength of short centrally compressed CTE can be determined using the method of limiting forces. The accuracy of calculations according to the proposed method depends on the correct determination of the coef-

ficients of the material. Currently, heavy concrete, which has a dense structure, is usually used for pipe-concrete columns. For such concretes, it is proposed to take the values that are obtained after processing the results of experiments conducted under volumetric compression with a constant lateral pressure. To establish these values, a statistical analysis of the results of 232 experiments with short centrally compressed CTE made of heavy concretes of medium and high strength was performed. For each experiment, coefficient values were selected corresponding to the best match between theoretical and experimental destructive loads.

**Results.** The methodology of the current standards does not allow to take into account the features of the concrete core in compressed CTE concretes of various types. In the proposed methodology, this issue is solved by appropriate selection of material coefficients. If there is a sufficient amount of experimentation with concrete CTE of a specific type, it is not difficult to find the values of the corresponding coefficients.

**Conclusions.** The developed method for calculating the strength of short centrally compressed solid waste takes into account the main features of the force resistance of a tube-concrete structure and allows us to determine the distribution of forces between the concrete core and the steel pipe.

**KEYWORDS:** axially compressed concrete tube element, compressive strength, stress state, volumetric compression, lateral pressure, force resistance, concrete core

**FOR CITATION:** Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A., Likhidko M.A. Strength of centrally compressed concrete tube elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1154-1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164 (rus.).

Corresponding author: Vladimir I. Rimshin, v.rimshin@niisf.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой практике строительства высотных зданий и большепролетных арочных мостов трубобетонные элементы (ТБЭ) занимают достойное место. Этому способствует ряд положительных качеств таких конструкций [1].

Расчет прочности даже коротких центрально сжатых ТБЭ является непростой задачей, так как он предполагает необходимость учета объемного напряженного состояния бетонного ядра и стальной трубы. По этой причине в действующих нормативных документах различных стран для определения прочности центрально сжатых ТБЭ предложены эмпирические

формулы, полученные на основании анализа опытных данных. В табл. 1 приведены такие формулы, предлагаемые нормами РФ и наиболее часто используемые на практике нормами других стран.

Эти формулы имеют ограниченное применение, поскольку получены применительно к тяжелому бетону. Они непригодны для других видов бетона и не могут учитывать возможные усовершенствования конструкции, например дополнительное косвенное армирование бетона [2]. При этом механические характеристики объемно сжатого бетона и осевые напряжения в стальной трубе рассчитываются вне прямой зависимости от величины боко-

Табл. 1. Формулы норм для расчета прочности центрально сжатых ТБЭ  
Table 1. Formulas of norms for calculating the strength of centrally compressed CTE

Номер нормативного документа Number of the regulatory document	Основные формулы Basic formulas
СП 266.1325800.2016 (Россия) CP 266.1325800.2016 (Russia)	$N_u = R_{bp} A_b + R_{pc} A_p;$ $R_{bp} = R_b + \Delta R_b \left( 1 - \frac{7,5e}{d - 2t} \right);$ $\Delta R_b = R_b \left( 2 + 2,52 \cdot e^{\frac{-1}{c} (R_s A_p + R_b A_b)} \right) \times$ $\times \frac{t}{d - 2t} \cdot \frac{R_p}{R_b};$ $R_{pc} = R_p - \frac{1}{4} R_p \left( 1 - \frac{7,5e_o}{d - 2t} \right),$ <p>где <math>c = 25</math> МН при измерении величин в МПа и м where <math>s = 25</math> MN when measuring values in MPa and m</p>
EN 1994-1-1 (евронормы) (Euronorm)	$N_u = A_b R_b \left( 1 + \frac{\eta_b t R_p}{d R_b} \right) +$ $+ \eta_p A_p R_p;$ $\eta_b = \eta_{bo} = 4,9 - 16,5\lambda + 17\lambda^2 \geq 0;$ $\eta_p = \eta_{po} = 0,25(3 + 2\lambda) \leq 1;$ $\lambda = \sqrt{\frac{N_u}{N_{cr}}}; N_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} (E_s I_s + 0,6 E_b I_b)$

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 8, 2025  
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 8, 2025

Номер нормативного документа Number of the regulatory document	Основные формулы Basic formulas
GB 50936–2014 (КНР) / (China)	$N_u = (1,212 + B\rho + C\rho^2)R_bA;$ $\rho = \frac{R_pA_p}{R_bA_b};$ $B = \frac{0,1759R_p}{235} + 0,794;$ $C = -\frac{0,1038R_b}{20} + 0,0309$
AISC 360–16 (США) / (USA)	$N_u = 0,95R_bA_b + R_pA_p$
АИЖ-1997 (Япония) / (Japan)	$N_u = N_b + (1 + 0,27)N_p;$ $N_b = R_bA_b;$ $N_p = R_pA_p$

вого давления, что не соответствует фактическому характеру силового сопротивления конструкции.

В настоящей работе рассмотрена методика расчета, основанная на современных знаниях механики твердого тела и учитывающая ключевые особенности напряженного состояния бетонного ядра и стальной трубы в предельном состоянии короткого центрально сжатого ТБЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прочность коротких центрально сжатых ТБЭ можно определить с помощью метода предельных усилий. Предельную величину продольного усилия рассчитывают по формуле:

$$N = R_{b3}A + \sigma_{pz}A_p,$$
 (1)

где  $R_{b3}$  — прочность бетонного ядра при объемном сжатии;  $A$  и  $A_p$  — площади поперечных сечений бетонного ядра и стальной трубы;  $\sigma_{pz}$  — сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе.

Для нахождения  $R_{b3}$  при равномерном боковом обжатии давлением  $\sigma_{br}$  в предельном состоянии ТБЭ обычно используется условие прочности, имеющее вид:

$$R_{b3} = R_b + k\sigma_{br},$$
 (2)

где  $R_b$  — прочность бетона при одноосном сжатии;  $k$  — коэффициент бокового давления.

Величину коэффициента бокового давления долго принимали постоянной и равной 4,1. Зависимость (2) положена в основу ряда и ныне действующих норм, например EN 1994-1-1.

В работе [3] отмечается, что значение коэффициента бокового давления не должно быть постоянным. По результатам статистической обработки опытных данных была предложена следующая формула:

$$R_{b3} = R_b \left( -1,254 + \right. \\ \left. + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_{br}}{R_b}} - 2 \frac{\sigma_{br}}{R_b} \right).$$
 (3)

Однако практическое применение формулы (3) нередко приводило к большим погрешностям в расчетах, что, например, показано в исследовании [4].

Важно отметить, что по формулам (2) и (3) невозможно напрямую вычислять прочность бетонного ядра ТБЭ, поскольку достоверная величина бокового давления  $\sigma_{br}$  неизвестна. Результаты опытов со сжатыми ТБЭ [5] показывают, что перед разрушением бетонного ядра обычной прочности боковое давление  $\sigma_{br}$  может находиться в достаточно широком интервале и нередко достигает 10–15 МПа и выше. Коэффициент бокового давления при этом в интервале  $k = 2,5–7$ . Следовательно, даже незначительные неточности в определении  $k$  и  $\sigma_{br}$  могут привести к существенным ошибкам в расчетах.

В публикациях имеются предложения по учету бокового давления. Например, в труде [3] для расчета трубобетонных колонн предложено упрощенно принимать  $\sigma_{br} = 0,1 \cdot \sigma_{yp}$ , где  $\sigma_{yp}$  — предел текучести стали трубы. Однако это предложение неверно, так как на боковое давление оказывают значительное влияние не только  $\sigma_{yp}$ , но также диаметр и толщина трубы, вид и прочность используемого бетона. Боковое давление рассчитывается в зависимости от отношения  $d/t$  и  $\sigma_{yp}$  по эмпирическим формулам [6]. Но при этом не учитывается прочность исходного бетона. Проведенный авторами настоящего исследования анализ показал, что по рекомендациям [3]  $\sigma_{br}$  получается заметно завышенным, а по формулам [6] — заниженным.

В работах [7, 8] теоретически показано, что фиксированное значение  $k$  является ошибочным. Это значение должно зависеть от уровня бокового обжатия  $m = \sigma_{br}/R_{b3}$  и вида бетона. Для условий трехосного равномерного бокового обжатия можно использовать следующую формулу:

$$k = \frac{1 - a - am}{b + (f - b)m},$$
 (4)

где  $a, b$  — коэффициенты материала, устанавливаемые на основании опытов;  $f$  — параметр, который для плотных бетонов равен 1.

Значение коэффициента бокового давления, по-видимому, отражает различные механизмы разрушения объемно сжатого бетона. Анализ [9] показывает, что при  $m \rightarrow 1$  коэффициент  $k \rightarrow 1$ . Тогда, в соответствии с законом Кулона, при высоких уровнях бокового обжатия разрушение бетона будет иметь сдвиговой характер. Согласно опытам, разрушение от сдвига наблюдается при  $k < 3$ . При более высоких  $k$  следует ожидать комбинации отрыва и сдвига бетона, что чаще всего и наблюдается при разрушении центрально сжатых ТБЭ. Таким образом, более теоретически обоснованное определение  $k$  и  $\sigma_{br}$  способствует не только повышению точности расчета прочности, но и правильной оценке характера силового сопротивления и разрушения конструкции. Это подтверждает необходимость принятия адекватных теоретических подходов к расчету прочности объемно сжатого бетона.

Таким образом, именно боковое давление определяет прирост прочности бетона за счет создания для него условий объемного сжатия. Поэтому первоочередной является задача нахождения бокового давления  $\sigma_{br}$  в предельном состоянии ТБЭ. При увеличении бокового давления прочность бетонного ядра возрастает, но сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе снижается. Искомое значение  $\sigma_{br}$  может быть найдено из решения задачи установления максимального сжимающего усилия, вычисляемого по формуле (1). Для этого выразим через боковое давление  $R_{b3}$  и  $\sigma_{pz}$ .

Зависимость  $R_{b3} = f(\sigma_{br})$  можно получить из совместного решения уравнений (2) и (4) при условии  $a = 0,5b$ . Соответствующая формула записывается в следующем виде:

$$R_{b3} = R_b \left[ 1 + \left( 0,25\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\bar{\sigma}$  — относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии  $\bar{\sigma} = \sigma_{br}/R_b$ .

Стальная труба уже при относительно небольших осевых деформациях, как правило, в пределах  $\varepsilon_{pz} = (0,85 \div 0,95) \cdot \sigma_{yp}/E_p$  ( $E_p$  — модуль упругости стали) находится в состоянии текучести. Напряженное состояние трубы к моменту разрушения ТБЭ можно определять из условия текучести Генки — Мизеса, из которого напряжение осевого направления в трубе  $\sigma_{pz}$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_{pz} = \sqrt{\sigma_{yp}^2 - 0,75\sigma_{pt}^2} - 0,5\sigma_{pt}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{pt}$  — напряжение окружного направления в стальной трубе в предельном состоянии.

Заметим, что формула (6) справедлива для тонкостенных труб (при  $d/\delta \geq 40$ , где  $d$  и  $\delta$  — диаметр и толщина стенки трубы). Именно такие трубы в основном

применяются в качестве стальных оболочек для сжатых ТБЭ. Поэтому в данной работе ограничимся этим решением. Для толстостенных труб вывод аналогичной формулы приведен в исследовании [5].

Осредненные по толщине окружные напряжения в стенке трубы можно с достаточной для практических расчетов точностью выразить через боковое давление с помощью зависимости:

$$\sigma_{pt} = -2\sigma_{br} \frac{A}{A_p}. \quad (7)$$

Формулу (6) с учетом зависимости (7) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{pz} = R_b \left( \sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}, \quad (8)$$

где  $\rho$  — конструктивный коэффициент трубобетона, вычисляемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{yp} A_p}{R_b A}. \quad (9)$$

С учетом полученных формул (5) и (8) уравнение для определения прочности короткого центрально сжатого ТБЭ можно записать в следующем виде:

$$N = R_b A \left[ 1 + \left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} - \frac{3\bar{\sigma}}{4} + \sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} \right) \right]. \quad (10)$$

Очевидно, что при фиксированных значениях геометрических и конструктивных параметров ТБЭ ( $R_b$ ,  $\sigma_y$ ,  $A$ ,  $A_p$ ,  $b$ ) продольная сила, воспринимаемая бетонным ядром и стальной трубой, зависит только от относительного бокового давления  $\bar{\sigma}$ . Максимальному значению продольной силы соответствует условие:

$$\frac{dN}{d\bar{\sigma}} = 0. \quad (11)$$

После определения производной выражения (10) приходим к следующему уравнению:

$$\left( \frac{b(\bar{\sigma} - 2) + 8}{\sqrt{b}\sqrt{b(\bar{\sigma} - 2)^2 + 16\bar{\sigma}}} - \frac{12\bar{\sigma}}{\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2}} - 1 \right) = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) приводит к формуле для нахождения бокового давления стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии:

$$\sigma_{br} \cong 0,49 e^{-(a+b)} \rho^{0,8} R_b. \quad (13)$$

При известном боковом давлении можно вычислить  $R_{b3}$ ,  $\sigma_{pz}$  и прочность ТБЭ.

Точность расчетов по предложенной методике зависит от правильного установления коэффициен-



тов материала  $a$  и  $b$ . В настоящее время для трубо-бетонных колонн, как правило, применяют тяжелый бетон, который имеет плотную структуру. Для таких бетонов в работе [9] предлагается принимать значения  $b = 0,096$  и  $a = 0,5b$ . Эти значения получены после обработки результатов опытов, проводившихся при объемном сжатии с постоянным по величине боковым давлением  $\sigma_{br}$ . Однако в центрально сжатых ТБЭ боковое давление зависит от уровня загрузки. При небольших нагрузках оно близко к нулю и достигает максимума только ближе к моменту потери прочности конструкцией. Такой характер загрузки приводит к меньшему росту прочности исходного бетона. Следовательно, значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для тяжелого бетона в ТБЭ будут другими.

Для установления этих значений выполнен статистический анализ результатов 232 опытов с короткими центрально сжатыми ТБЭ из тяжелых бетонов средней и высокой прочности [5].

Учитывались только те опыты, в которых за прочность образцов принималась максимальная нагрузка, которую они выдерживали. Для каждого опыта подбирались значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , соответствующие наилучшему совпадению теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок. В результате установлены их медианные значения, которые составили  $b = 0,25$  и  $a = 0,125$ .

**Проверка точности предложенной методики расчета**

Полученные значения коэффициентов материала первоначально были использованы для определения теоретических разрушающих нагрузок для всех 232 испытанных образцов. Результаты оценки соответствия теоретической прочности  $N_i^{th}$  экспериментальным данным  $N_u^{exp}$  приведены в табл. 2.

Нижний индекс теоретической прочности соответствует порядковому номеру методики в табл. 1. Результат расчета по предлагаемой методике обозначен.

Данные табл. 2 показывают, что из анализируемых нормативных документов наиболее близкие к опытам значения прочности позволяет получить методика евронорм. Расчеты по методикам РФ и Япо-

нии в среднем приводят к запасам 5 %, что тоже неплохо. Однако результаты расчетов по предлагаемой методике свидетельствуют о более высокой ее точности, особенно по показателю среднего значения. Стандартное отклонение величиной 10 % следует считать вполне удовлетворительным. В проведенном анализе использованы результаты опытов не менее 39 исследователей. Разная квалификация исследователей, стабильность свойств применяемых материалов, качество изготовления и подготовки образцов, точность соблюдения методики испытаний не могли не сказаться на разбросе.

Дополнительную проверку расчетные методики прошли по результатам сопоставления теоретических значений с опытными разрушающими нагрузками, полученными в диссертационных работах А.П. Нестеровича, С.В. Коврыги и В.Л. Шаброва, которые были выполнены под руководством И.Г. Людковского [10]. Все эксперименты тщательно готовились и осуществлялись в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, который в конце прошлого века являлся одним из всемирно признанных исследовательских центров бетонных и железобетонных конструкций. Особая ценность этих опытных данных состоит в том, что они получены для образцов ТБЭ с диаметрами поперечного сечения от 530 до 1020 мм. Именно такие сечения часто имеют трубобетонные колонны многоэтажных и высотных зданий.

Выполненная проверка показала, что первоначально полученные значения коэффициентов  $b = 0,25$  и  $a = 0,125$  при обработке 23 результатов опытов привели к среднему значению 0,97 при стандартном отклонении 0,029. Так как эти эксперименты приняты за эталонные, по результатам сопоставления с ними были получены уточненные значения коэффициентов материала для тяжелого бетона  $b = 0,288$  и  $a = 0,144$ . Проверка применимости уточненных значений  $b$  и  $a$  для расчета прочности приведена в табл. 3.

Для сравнения здесь же приведены результаты оценки соответствия опытных разрушающих нагрузок теоретическим значениям, рассчитанным по методикам указанных в табл. 1 норм.

**Табл. 2.** Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ

**Table 2.** Comparison of experimental and theoretical CTE strengths

Итоговый статистический показатель The final statistical indicator	$\frac{N_u^{exp}}{N_1^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_2^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_3^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_4^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_5^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_6^{th}}$
Среднее значение Average value	1,05	0,99	1,05	1,21	1,05	1,00
Стандартное отклонение Standard deviation	0,12	0,09	0,18	0,12	0,09	0,10



Табл. 3. Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ больших диаметров

Table 3. Comparison of experimental and theoretical strengths of large diameter TBE

$d$ , мм mm	$\delta$ , мм mm	$\sigma_{y,p}$ , МПа MPa	$R_b$ , МПа MPa	$N_u^{exp}$ , кН kN	$\frac{N_u^{exp}}{N_1^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_2^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_3^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_4^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_5^{th}}$	$\frac{N_u^{exp}}{N_6^{th}}$
530,0	7,80	349,2	34,5	14 000	1,00	0,97	1,02	1,12	1,03	1,02
530,0	11,85	322,6	34,5	16 000	0,98	0,95	1,04	1,18	1,03	1,02
630,0	6,60	303,0	28,4	13 700	1,00	0,97	1,01	1,10	1,02	1,00
630,0	7,00	225,0	40,0	16 200	1,05	0,98	0,98	1,08	1,02	1,03
630,0	7,00	291,4	40,0	16 690	0,99	0,94	0,95	1,05	0,98	0,98
630,0	7,61	349,5	35,0	18 000	0,99	0,94	0,97	1,11	0,99	0,98
630,0	7,61	349,5	41,5	21 000	1,05	0,94	1,00	1,15	1,04	1,03
630,0	7,90	300,0	36,0	17 200	0,97	0,92	0,94	1,08	0,97	0,96
630,0	7,90	300,0	72,0	28 700	1,03	0,98	0,90	1,08	0,99	0,99
630,0	8,44	350,0	34,5	18 600	0,99	0,94	0,98	1,13	1,00	0,99
630,0	8,44	515,0	34,5	21 000	0,93	0,90	0,93	1,09	0,95	0,94
630,0	9,8	311,0	34,9	19 000	0,99	0,95	0,99	1,14	1,01	1,00
630,0	10,2	308,0	39,4	21 090	1,03	0,97	1,01	1,16	1,03	1,02
630,0	10,21	323,3	39,4	20 500	1,00	0,95	0,98	1,12	1,00	0,99
630,0	11,60	347,2	46,0	24 400	0,99	0,94	0,97	1,12	0,99	0,98
720,0	7,70	395,4	28,3	21 000	0,99	0,94	0,99	1,14	1,00	1,00
720,0	7,93	388,4	34,0	25 500	1,09	1,03	1,06	1,22	1,09	1,08
720,0	8,30	312,0	15,9	15 000	0,98	0,96	1,09	1,22	1,05	1,05
720,0	9,55	315,6	28,3	20 600	0,98	0,93	0,99	1,13	1,00	0,99
720,0	11,7	274,0	28,3	21 000	0,98	0,93	0,99	1,14	1,00	0,99
820,0	8,93	331,0	45,0	33 600	1,01	0,93	0,92	1,07	0,97	0,97
1020,0	9,64	366,0	16,9	30 000	1,02	0,95	1,05	1,19	1,04	1,03
1020,0	13,25	368,7	28,9	44 000	1,02	0,92	0,98	1,12	0,99	0,98
Максимум / Maximum					1,09	1,03	1,09	1,22	1,09	1,08
Минимум / Minimum					0,93	0,89	0,92	1,05	0,96	0,94
Среднее значение / Average value					1,002	0,950	0,989	1,130	1,012	1,000
Стандартное отклонение / Standard deviation					0,033	0,030	0,044	0,045	0,031	0,030

Примечание: в расчетах по нормам Европы, США и Японии вместо призменной прочности бетона  $R_b$  использовалась цилиндрическая прочность.

Note: in calculations according to European, US and Japanese standards, cylindrical strength was used instead of prismatic strength of concrete.

Анализ полученных в табл. 3 данных свидетельствует о том, что проверенные методики действующих норм (за исключением норм США) позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать прочность центрально сжатых ТБЭ. По показателям среднего значения и стандартного отклонения наиболее точными оказались формулы EN 1994-1-1. При этом предлагаемая авторами методика показала наилучшие результаты выполненного сопоставления.

Использование коэффициентов  $b = 0,288$  и  $a = 0,144$  для расчетов по предлагаемой методике ранее упомянутых 232 испытанных образцов привело к следующим статистическим результатам:

- среднее значение — 1,04;
- стандартное отклонение — 0,10.

Полученные результаты говорят о небольшом запасе фактической прочности при применении среднего значения. Стандартное отклонение оста-

лось неизменным. Таким образом, уточненные значения коэффициентов материала можно рекомендовать для использования в практических расчетах сжатых ТБЭ.

В табл. 4 приведены результаты аналогичного сопоставления теории с экспериментальной прочностью ТБЭ, изготовленных из ультравысококачественных бетонов (УНРС), имеющих гарантированное сопротивление осевому сжатию более 100 МПа. Данные для этого сопоставления взяты из работ [4, 6, 11].

Анализ табл. 4 показывает, что точность вычисления прочности ТБЭ, изготовленных из УНРС, по всем нормативным документам оказалась хуже. При этом методика АИЖ-1997 все равно показала удовлетворительное совпадение с экспериментами. Предлагаемая методика (причем при тех же значениях коэффициентов материала) и для такого бетона обеспечила очень хорошую точность расчетов.

Табл. 4. Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ из УНРС

Table 4. Comparison of experimental and theoretical strengths of TBE made of UHPC

$d$ , мм mm	$\delta$ , мм mm	$\sigma_{\text{ср}}$ , МПа MPa	$f_c$ , МПа MPa	$N_u^{\text{exp}}$ , кН kN	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_1^{\text{th}}}$	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_2^{\text{th}}}$	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_3^{\text{th}}}$	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_4^{\text{th}}}$	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_5^{\text{th}}}$	$\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_6^{\text{th}}}$
114,3	3,6	403	173,5	2422	1,15	1,06	0,96	1,22	1,10	1,08
114,3	3,6	403	173,5	2430	1,11	1,02	0,93	1,18	1,06	1,04
114,3	3,6	403	184,2	2497	1,13	1,05	0,94	1,20	1,09	1,06
114,3	3,6	403	184,2	2314	1,05	0,97	0,88	1,11	1,01	0,99
114,3	6,3	428	173,5	2610	1,07	0,96	0,97	1,16	1,02	1,00
114,3	6,3	428	173,5	2633	1,08	0,97	0,98	1,17	1,02	1,02
219,1	5,0	380	185,1	7837	0,99	0,96	0,84	1,07	0,98	0,96
219,1	5,0	380	193,3	8664	1,06	1,03	0,90	1,14	1,05	1,03
219,1	10,0	381	185,1	9085	1,01	0,97	0,90	1,14	1,02	1,00
219,1	10,0	381	193,3	9187	0,99	0,96	0,88	1,12	1,00	0,98
219,1	6,3	300	163,0	6915	0,99	0,95	0,84	1,07	0,98	0,96
219,1	6,3	300	175,4	7407	1,00	0,96	0,84	1,08	0,99	0,97
219,1	6,3	300	148,8	6838	1,04	1,00	0,90	1,14	1,04	1,02
219,1	6,3	300	174,5	7569	1,03	0,99	0,86	1,11	1,02	0,99
114,3	4,8	333	127,0	1681	1,01	1,54	1,18	1,06	0,94	1,02
114,3	4,8	333	127,0	1573	0,95	1,44	1,11	0,99	0,88	1,00
Максимум / Maximum					1,15	1,54	1,18	1,22	1,10	1,08
Минимум / Minimum					0,99	0,95	0,84	0,99	0,88	0,96
Среднее значение / Average value					1,08	1,08	0,97	1,14	1,01	1,004
Стандартное отклонение / Standard deviation					0,065	0,165	0,084	0,045	0,054	0,032

Примечание: в расчетах по нормам РФ, КНР и предложенной методике вместо цилиндрической прочности бетона использовалась призматическая прочность.  
Note: in the calculations according to the norms of the Russian Federation, PRC and the proposed methodology, the prism strength was used instead of the cylindrical strength of concrete.

Здесь следует заметить, что количество проведенных экспериментов для ТБЭ с УНРС пока недостаточно, чтобы на основании полученных результатов давать окончательные предложения для практических расчетов. Но хорошее соответствие теоретических значений прочности опытным данным практически по всем исследованным образцам позволяет сделать заключение о возможности успешного использования предложенной методики и в этом случае.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первый взгляд представленные в табл. 2, 3 результаты сопоставления свидетельствуют о применимости для практических расчетов методик всех анализируемых нормативных документов, кроме норм AISC 360-16. Но более глубокий анализ приводит к другому выводу.

В методиках действующих норм при расчете прочности ТБЭ непосредственно не учитывается боковое давление бетона в предельном состоянии. Выше показано, что боковое давление бетона оказывает существенное влияние на прочность бетона в условиях его объемного сжатия и напряжения осевого направления в стальной трубе. С использованием статистической обработки формулы для расчета прочности в анализируемых методиках подобраны

таким образом, что усилия в бетоне и трубе дают сумму, которая хорошо соответствует фактической прочности ТБЭ. Однако особенность ТБЭ заключается в том, что если в расчетах занижить одно из усилий (в бетоне или стальной трубе), то автоматически будет завышено другое усилие (в трубе или бетоне). В результате сумма усилий меняется незначительно.

Для подтверждения этого предположения для данных табл. 3 были отдельно определены предельные усилия в бетоне и стальной трубе по предлагаемой авторами методике, а также методикам EN 1994-1-1 и СП 266.1325800. Сопоставление полученных результатов показало, что методика EN 1994-1-1 завышает усилие в стальной трубе в среднем в 1,9 раза, а методика СП 266.1325800 — в 1,8 раза.

Указанное обстоятельство свидетельствует о неправильном распределении сжимающего усилия между бетоном и трубой. Это приводит как минимум к двум негативным последствиям:

- невозможности использовать данные расчетов центрально сжатых элементов для разработки достоверной методики оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности внецентренно сжатых ТБЭ;
- неправильной оценке напряженного состояния стали и бетона трубобетонных колонн в зоне

их стыков с междуэтажными перекрытиями или покрытиями.

Вопросы расчета внецентренно сжатых элементов требуют отдельного подробного анализа, который планируется к рассмотрению в будущих исследованиях [12–20].

Второе негативное последствие непосредственно касается центрально сжатых колонн. Усилия на такие колонны от перекрытий могут передаваться по трем вариантам: через стальную трубу, бетонное ядро, с частичным вовлечением в работу и трубы, и бетона. Во всех случаях адекватная оценка напряженного состояния колонны в зоне стыка возможна при достоверном знании усилий в трубе и бетоне.

Также следует отметить, что в последние годы проявляется интерес к исследованиям эффективности применения в сжатых ТБЭ бетонов различных видов. Например, в работе [4] изучается поведение таких конструкций с шестью различными видами бетона. Количество исследуемых образцов пока мало, чтобы делать какие-либо обоснованные выводы. Но неприемлемость нормативных методик для всех шести видов

бетонов очевидна. При этом известно [9], что по сравнению с тяжелыми бетонами легкие и мелкозернистые бетоны хуже сопротивляются объемному сжатию. Методики действующих норм не позволяют учесть такие особенности бетонного ядра. В предлагаемой методике данный вопрос решается за счет соответствующего подбора коэффициентов материала. При наличии достаточного объема экспериментов с ТБЭ из бетона конкретного вида найти значения соответствующих коэффициентов несложно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика расчета прочности коротких центрально сжатых ТБЭ, основанная на известных зависимостях механики твердого тела. Методика учитывает ключевые особенности силового сопротивления трубобетонной конструкции и позволяет определить распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой. Подобраны коэффициенты материала для тяжелого бетона различной прочности, обеспечивающие хорошее совпадение теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 138. Pp. 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001
2. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1087. Pp. 163–168. DOI: 10.4028/p-7841oa
3. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // *Journal of Structural Engineering*. 1988. Vol. 114. Issue 8. Pp. 1804–1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)-114:8(1804)
4. Hossain K.M.A., Chu K. Confinement of six different concretes in CFST columns having different shapes and slenderness // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 2. Pp. 255–270. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2
5. Кришан А.Л., Румишин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. М. : Издательство ACB, 2020. 322 с. EDN ROLLKN.
6. Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Bai Y. Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 179. Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081
7. Карпенко Н.И. Об одной характерной функции прочности бетонов при трехосном сжатии //

- Строительная механика и расчет сооружений. 1982. № 2. С. 33–36.
8. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А. Критерий прочности бетона при объемном напряженном состоянии и действии повышенных температур // *Academia. Архитектура и строительство*. 2024. № 4. С. 117–123. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123. EDN WGFKEZ.
9. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
10. Людковский И.Г., Фонов В.М., Макаричева Н.В. Исследование сжатых трубобетонных элементов, армированных высокопрочной продольной арматурой // *Бетон и железобетон*. 1980. № 5. С. 17–19.
11. Xu L., Lu Q., Chi Y., Yang Y., Yu M., Yan Y. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 204. Pp. 754–767. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202
12. Rimshin V., Ketsko E. Justification of Strengthening of Reinforced Concrete Structures of an Industrial Building with Composite Materials // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Pp. 129–138. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6\_14
13. Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental investigation on steel-tube-confined-concrete stub column with different cross-section shapes under uniaxial-compression // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. P. 105729. DOI: 10.1016/J.JCSR.2019.105729

14. Venkateshwaran A., Lai B., Liew J.Y.R. Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete encased steel short columns and beams // *ACI Structural Journal*. 2021. Vol. 118. Issue 1. Pp. 45–59. DOI: 10.14359/51728077

15. Lai B., Liew J.Y.R. Investigation on axial load-shortening behaviour of high strength concrete encased steel composite section // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 227. P. 111401. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111401

16. Гвоздев А.А. Задачи и перспективы развития теории железобетона // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1981. № 6. С. 14–17.

17. Стороженко Л.И., Ермоленко Д.А., Лапенко О.И. Трубобетон : монография. Полтава : АСМІ, 2010. 305 с.

18. Варламов А.А., Гаврилов В.Б., Сагадатов А.И. Комплексный метод оценки напряженно-деформированного состояния и долговечности железобетонных конструкций // *БСТ: бюллетень строительной техники*. 2017. № 11 (999). С. 29–31. EDN ZRVWRR.

19. Васильев А.И., Подвальный А.М. Комплексное влияние агрессивных факторов среды на коррозию арматуры в защитном слое // *Бетон и железобетон*. 2010. № 2. С. 26–29.

20. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102. EDN TLLYWN.

Поступила в редакцию 8 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Анатолий Леонидович Кришан — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и строительства зданий, советник РААСН; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; главный 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; РИНЦ ID: 535561, Scopus: 56200412900, ORCID: 0000-0002-5851-152X; kris\_al@mail.ru;

Владимир Иванович Римшин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального хозяйства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией 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: 9629-5322, РИНЦ ID: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

Мария Александровна Астафьева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; 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; РИНЦ ID: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021; skymanika@mail.ru;

Михаил Александрович Лихидько — аспирант кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; РИНЦ ID: 1038214; likhidkom@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns. *Thin-Walled Structures*. 2019; 138:105-116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001

2. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement. *Materials Science Forum*. 2023; 1087:163-168. DOI: 10.4028/p-7841oa

3. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988; 114(8):1804-1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)

4. Hossain K.M.A., Chu K. Confinement of six different concretes in CFST columns having different shapes and slenderness. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019; 11(2):255-270. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2



5. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astaf'eva M.A. Compressed concrete filled steel elements. *Theory and practice*. Moscow, ASV, 2020; 322. EDN ROLLKN. (rus.).
6. Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Bai Y. Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design. *Engineering Structures*. 2019; 179:268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081
7. Karpenko N.I. On one characteristic function of concrete strength under triaxial compression. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1982; 2:33–36. (rus.).
8. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Moiseenko G.A. Criterion of concrete strength under volumetric stress state and elevated temperatures. *Academia. Architecture and Construction*. 2024; 4:117–123. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123. EDN WGFKEZ. (rus.).
9. Karpenko N.I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow, 1996; 416. (rus.).
10. Lyudkovskiy I.G., Fonov V.M., Makaricheva N.V. Study of compressed concrete filled steel elements reinforced with high-strength longitudinal reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1980; 5:17–19. (rus.).
11. Xu L., Lu Q., Chi Y., Yang Y., Yu M., Yan Y. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber. *Construction and Building Materials*. 2019; 204:754–767. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202
12. Rimshin V., Ketsko E. Justification of Strengthening of Reinforced Concrete Structures of an Industrial Building with Composite Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 129–138. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6\_14
13. Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental investigation on steel-tube-confined-concrete stub column with different cross-section shapes under uniaxial-compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162:105729. DOI: 10.1016/J. JCSR.2019.105729
14. Venkateshwaran A., Lai B., Liew J.Y.R. Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete encased steel short columns and beams. *ACI Structural Journal*. 2021; 118(1):45–59. DOI: 10.14359/51728077
15. Lai B., Liew J.Y.R. Investigation on axial load-shortening behaviour of high strength concrete encased steel composite section. *Engineering Structures*. 2021; 227:111401. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT. 2020.111401
16. Gvozdev A.A. Tasks and prospects for the development of the theory of reinforced concrete. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1981; 6:14–17. (rus.).
17. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. *Pipe concrete : monograph*. Poltava, ACMI, 2010; 305. (rus.).
18. Varlamov A.A., Gavrilov V.B., Sagadatov A.I. Comprehensive evaluation method of stress-strain state and durability of reinforced concrete structures. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2017; 11(999):29–31. EDN ZRVWRR. (rus.).
19. Vasiliev A.I., Podvalny A.M. The complex influence of aggressive environmental factors on the corrosion of reinforcement in the protective layer. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2010; 2:26–29. (rus.).
20. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Yerofeev V.T. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 1:93–102. EDN TLLYWH. (rus.).

Received April 8, 2025.

Adopted in revised form on April 14, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

**B I O N O T E S :** **Anatoly L. Krishan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Construction of Buildings, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st., 455000, Magnitogorsk, Russian Federation; chief researcher of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 535561, Scopus: 56200412900, ORCID: 0000-0002-5851-152X; kris\_al@mail.ru;

**Vladimir I. Rimshin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 9629-5322, ID RSCI: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

**Maria A. Astafieva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Construction of Buildings; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st.,



455000, Magnitogorsk, Russian Federation; Senior Researcher, Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021; skymanika@mail.ru;

**Mikhail A. Likhidko** — postgraduate student of the Department of Design and Construction of Buildings; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st., 455000, Magnitogorsk, Russian Federation; ID RSCI: 1038214; likhidkom@yandex.ru.

*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.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.072.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177

## Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций

Владимир Иванович Колчунов, Павел Анатолиевич Кореньков,  
Наталья Витальевна Федорова

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последние годы проведены ряд экспериментальных и значительное количество численных исследований с целью изучения механизмов сопротивления железобетонных каркасов зданий как при проектных нагрузках, так и при аварийных и особых аварийных воздействиях. Актуальность подобных исследований определяется необходимостью оценки деформирования и разрушения таких конструктивных систем в целом и фрагментарным изучением узлов рам и стен, содержащих как зоны чистого изгиба, так и зоны поперечного изгиба при наличии и отсутствии продольных сил. Напряженно-деформированное состояние (НДС) и координаты точек образования пространственных трещин в конструкциях таких фрагментов остаются малоизученными, в совокупности с неисследованными эффектами, возникающими при нарушении сплошности железобетона.

**Материалы и методы.** При разработке объема экспериментальных исследований особое внимание было уделено такому моделированию узлов рам и стен, которые не искажали бы НДС изучаемых зон при местном приложении нагрузки, предельно упростили бы исследование узлов сопряжения (статически определяемые фрагменты узлов) и в то же время позволяли оценивать перераспределение усилий в статически неопределимых системах с учетом податливости узлов и реальной картины трещинообразования.

**Результаты.** Выполнено обоснование принятых конструктивных решений опытных железобетонных конструкций узлов, разработаны программа и методика проведения исследований рассматриваемых типов узловых соединений рамных систем, которые дают возможность составить схему испытаний для экспериментального выявления особенности действительной работы указанного вида конструкций.

**Выводы.** Разработаны программа и методика экспериментальных исследований по изучению особенностей трещинообразования, деформирования и разрушения узлов железобетонных рамных конструкций с учетом различного характера их НДС. Особое внимание уделено определению углов поворота, оценке деформативности и податливости узлов, а также прогибов, схем образования, развития и раскрытия трещин, деформированию бетона в сложно напряженных областях узлов железобетонных конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железобетонные конструкции, сложное напряженное состояние, углы поворота, прогибы, раскрытие пространственных трещин, экспериментальная проверка расчетной модели

*Благодарности.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010 (URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Колчунов В.И., Кореньков П.А., Федорова Н.В. Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1165–1177. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177

*Автор, ответственный за переписку:* Павел Анатолиевич Кореньков, [kra\\_gbk@mail.ru](mailto:kra_gbk@mail.ru).

## Experimental research programme of complex stressed nodes of reinforced concrete structures

Vladimir I. Kolchunov, Pavel A. Korenkov, Natalia V. Fedorova  
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** In recent years, a number of experimental and a significant number of numerical studies have been conducted to study the resistance mechanisms of reinforced concrete building frames both under design loads and under emergency and special emergency impacts. The relevance of such studies is determined by both the need to assess the deformation and destruction of such structural systems as a whole and by a fragmentary study of frame and wall units containing both pure bending zones and transverse bending zones in the presence and absence of longitudinal forces. The stress-strain state and the coordinates of the points of formation of spatial cracks in the structures of such fragments remain poorly understood, together with the unexplored effects that arise when the continuity of reinforced concrete is violated.

**Materials and methods.** When developing the volume of experimental studies, special attention was paid to such modelling of frame and wall nodes that would not distort the stress-strain state of the studied zones with local application of load, would simplify the study of mating nodes (statically determinate fragments of nodes) to the maximum and at the same time allow for the evaluation of the redistribution of forces in statically indeterminate systems taking into account the flexibility of nodes and the real picture of crack formation.

**Results.** The justification of the adopted design solutions of experimental reinforced concrete structures of nodes was completed and a programme and methodology for conducting research on the considered types of nodal connections of frame systems was developed, which allows for the development of a test scheme for the experimental identification of the features of the actual operation of the specified type of structures.

**Conclusions.** A programme and methodology of experimental research were developed to study the characteristics of crack formation, deformation and destruction of reinforced concrete frame structures, taking into account the different nature of their stress-strain state. Particular attention is paid to determining rotation angles, assessing the deformability and flexibility of nodes, as well as deflections, patterns of formation, development and opening of cracks, as well as deformation of concrete in complex stressed areas of reinforced concrete structures.

**KEYWORDS:** reinforced concrete structures, complex stress state, rotation angles, deflections, opening of spatial cracks, experimental verification of the calculation model

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-49-10010 (URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

**FOR CITATION:** Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Fedorova N.V. Experimental research programme of complex stressed nodes of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1165-1177. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177 (rus.).

*Corresponding author:* Pavel A. Korenkov, kpa\_gbk@mail.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей преодоления трудностей при решении различных вопросов теории железобетона является построение и реализация адекватных расчетных моделей. Однако этот подход предъявляет большие требования к экспериментам, результаты которых закладываются в основу модели. Поэтому при наборе объема экспериментальных исследований особое внимание необходимо уделять таким фрагментам узлов рам и стен, которые не искажали бы напряженно-деформированное состояние (НДС) изучаемых зон при местном приложении нагрузки, предельно упрощали бы исследование узлов сопряжения (статически определимые фрагменты узлов) и в то же время позволяли достаточно строго оценивать перераспределение усилий в статически неопределимых нелинейно деформируемых системах с учетом податливости узлов.

Экспериментальные исследования показывают, что трещинообразование в узловых зонах начинается на ранних этапах нагружения, поэтому использование жесткого соединения ригеля и колонны при проведении инженерных расчетов служит грубым допущением [1–4]. Характер разрушения узловых зон, как правило, определяется типом соединения непосредственно узловой зоны и участков колонны и балки, к нему прилегающей, и схемами армирования этих зон, что оказывает решающее влияние на характер распределения внутренних усилий в конструктивной системе<sup>1, 2</sup>.

<sup>3, 4, 5</sup> [5–10]. Построение адекватных моделей расчетного сопротивления узловых зон требует проведения целенаправленных экспериментальных исследований с учетом отмеченных физических особенностей деформирования.

Сегодня известны отдельные случаи проведения опытных исследований железобетонных конструкций (ЖБК) монолитных узлов железобетонных рам, подверженных сложному напряженному состоянию, в которых отражено относительно малое количество рассматриваемых параметров [11, 12], в основном ограничиваясь сейсмическими воздействиями [13–17]. Исследования направлены на изучение работы узловых соединений из новых видов бетонов, в основном ограничиваясь сталефибробетонами [18]. Нет исследований конструкций узлов сплошного и составного сечения из высокопрочного тяжелого и легкого бетонов.

В проведенных в последние годы экспериментах отражен так называемый деформационный эффект (эффект нарушения сплошности) [19, 20], возникающий в областях пересечения трещинами рабочей арматуры. В частности, в результате исследований проф. В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунова<sup>3</sup> установлено, что воздействие этого эффекта на равно-

<sup>3</sup> Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона : монография. М. : АСВ, 2004. 471 с.

<sup>4</sup> Мамин А.Н. Расчет железобетонных конструкций многоэтажных зданий с учетом нелинейности и изменяющейся податливости на основе многоуровневой дискретизации несущих систем : дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 437 с.

<sup>5</sup> Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости узловых сопряжений сборных железобетонных конструкций. М. : Ассоциация «Железобетон», ОАО «ЦНИИПромзданий», 2002. 88 с.

<sup>1</sup> Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 412 с.

<sup>2</sup> Гольшев А.Б., Колчунов Вл.И. Сопротивление железобетона. Киев : Основа, 2009. 432 с.

весие усилий в поперечном сечении может достигать порядка 40 %. Это обуславливает актуальность анализа такого дифференциального параметра, как трещиностойкость при изучении ЖБК в рассматриваемом напряженном состоянии. Названные параметры — основополагающие для выполнения анализа сопротивления железобетона в окрестностях, примыкающих к местам пересечения трещинами рабочей арматуры.

До настоящего времени при осуществлении экспериментальных исследований не были изучены фрагменты узлов рам и стен, содержащие как зоны чистого изгиба, так и зоны поперечного изгиба при наличии и при отсутствии продольных сил. Напряженно-деформированное состояние и координаты точек образования пространственных трещин в таких конструкциях остаются малоизученными. При этом остаются не исследованными эффекты, возникающие при нарушении сплошности железобетона, накоплено незначительное количество экспериментальных данных, характеризующих длину и приращение трещин при возрастании нагрузки.

Поэтому дальнейшее уточнение зависимостей, используемых для определения таких параметров, как обобщенная нагрузка образования различных пространственных трещин  $R_{sup,crc}$ , и координат их образования, связано с проведением новых целенаправленных экспериментальных исследований ЖБК. Информация, полученная в результате этих исследований, позволит более полно и адекватно раскрыть особенности сопротивления железобетонных конструкций.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На начальном этапе для оценки особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения конструкции узловых соединений были проанализированы результаты экспериментальных исследований узловых соединений конструктивных элементов. Опираясь на опыт результатов изучения конструктивных систем, приведенных в работах [1–4, 11–19], в качестве физической и соответственно расчетной модели для анализа НДС приняты крестообразные узлы как наиболее полные<sup>3</sup> (рис. 1). Фраг-

менты ограничены удалением консолей от центра узла на расстояние  $2h$ , что позволяет исключить влияние зон местного приложения нагрузок на НДС исследуемого узла сопряжения (рис. 2, а).

Армирование конструкций соединения ригеля и колонны выполнено пространственными каркасами. Рабочая продольная арматура изготовлена из стрежней диаметром 6 и 8 мм класса А240С, поперечная диаметром 6 мм класса А240С. Основная продольная арматура установлена без обрывов, однако в нижней и верхней зонах присутствуют дополнительные стержни, наличие которых отражает действительную схему армирования балочных элементов, при которой некоторая часть рабочей арматуры обрывается, согласно эпюры изгибающих моментов. Принятый класс продольного армирования обусловлен значительным продольным удлинением с сохранением постоянства напряжений арматуры класса А240С, что позволит детально изучить механику трещинообразования, деформирования и разрушения конструкций из новых бетонов на всех уровнях нагружения.

Материал конструкций узлов — тяжелый бетон класса В30, высокопрочный тяжелый класса В100 и высокопрочный легкий бетон класса В70. Также в качестве объекта исследования планируется рассмотреть фрагменты стен связевых каркасов. Армирование и схема приложения нагрузок приведены на рис. 2, б. Материал конструкций стен высокопрочный легкий бетон класса В60.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Цели и задачи эксперимента

Для выполнения экспериментальных исследований железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений сформулированы следующие задачи:

- 1) разработка программы и методики сопротивления ЖБК из обычного, высокопрочного и легкого высокопрочного бетона;
- 2) формулирование исходных предпосылок для построения расчетного аппарата по уточнению расчета трещиностойкости железобетонных узлов конструкций (в том числе сложных) с учетом взаим-

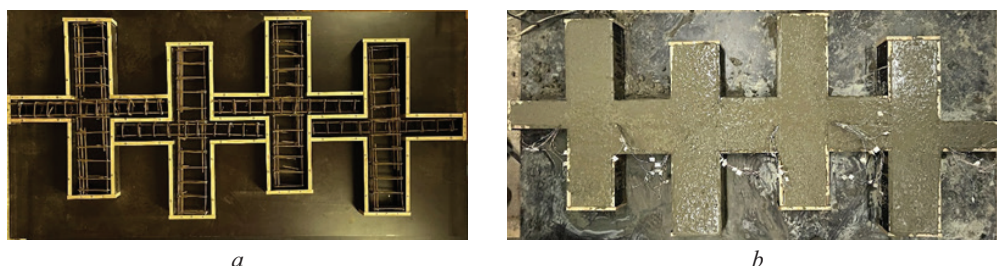


Рис. 1. Опалубочные формы с установленными арматурными каркасами (а) и общий вид забетонированных опытных образцов (б)

Fig. 1. Formwork forms with installed reinforcement cages (а) and general view of concreted test specimens (б)

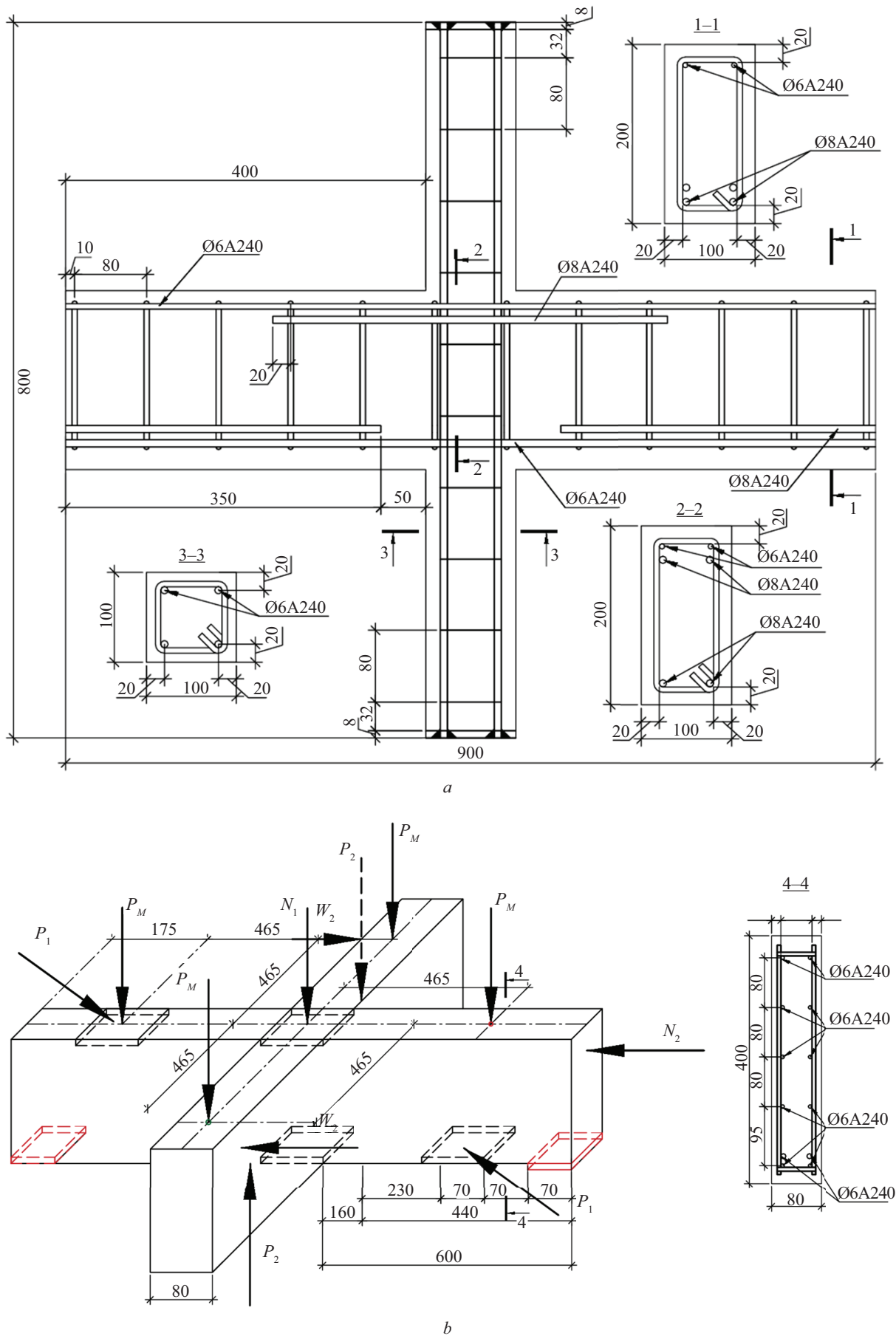


Рис. 2. Общий вид конструкций крестообразных узлов (а) и стен (b)

Fig. 2. General view of the structures of cross-shaped nodes (a) and walls (b)



ного деформирования арматуры и бетона и эффекта нарушения сплошности;

3) изучение закономерностей НДС железобетонных конструкций (в том числе сложных) при действии деформационного воздействия.

Количество опытных образцов от одного до трех штук назначено исходя из рассматриваемых параметров с тем, чтобы довести их общее количество до 18 штук исходя из расчетных сочетаний нагрузок (РСН) их параметров. Схема экспериментальных опытных ЖБК представлены на рис. 2, 3.

Экспериментальные исследования железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений, шифр для серий «У-И-РСН-тб» с изгибающим моментом, приложенных к ригелю; серия «У-В-РСН-тб» учитывает дополнительную горизонтальную силу в колонне; шифр серии «У-Т-тб» испытывает сдвиговые деформации в уровне ригеля. Шифры серии «У-И-Т-тб» и «У-И-В-тб» моделируют совместное действие изгиба и горизонтальных воздействий в ригеле и колонне соответственно. В серии «У-Сум-РСН-тб» рассматривается совместное действие всех обозначенных ранее силовых и деформационных воздействий.

Серии «У-И-РСН-вл» и «У-В-РСН-вл» аналогичны первой и второй с такой разницей, что выполнены из высокопрочного легкого бетона. Серия «У-В-РСН-вл» аналогична второй и шестой, но изготовлена из высокопрочного тяжелого бетона.

В сериях «С-И-РСН-вл» и «С-В-РСН-вл» будут изучены крестообразные пересечения монолитных стен, выполненных из высокопрочного легкого бетона и подверженных действию изгибных и сдвиговых воздействий соответственно.

В ходе проведения эксперимента планируется получить следующие параметры:

- опытное значение обобщенной опорной реакции  $R_{sup,crc}$  в момент образования пространственных трещин и при разрушении  $R_{sup,u}$  конструкций железобетонных узлов;
- координаты образования пространственных трещин: расстояние по горизонтали  $x$  от опорной реакции и расстояние по вертикали  $y$  от геометрической оси;
- фактическую высоту сжатой зоны  $x_{fact}$  и высоту сжатого бетона над наклонной трещиной  $x_v$  в рабочем сечении I–I и сечении III–III, проходящем через конец пространственной трещины;
- прогибы и углы поворота сечений конструкций на разных этапах нагружения;
- ширину раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля пространственной трещины;
- изменение расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  в зависимости от уровня (ступеней) нагружения;

- главные деформации в сжатом и растянутом бетоне в наиболее напряженных рабочих сечениях I–I и III–III над пространственной трещиной;
- значение проекций пространственных трещин на горизонтальную ось конструкции узлов;
- поэтапные картины цифровой фотофиксации схем образования, развития и раскрытия пространственных трещин по всем граням узлов железобетонных конструкций.

### Схемы нагружения и конструкции опытных образцов

Программа исследований включает лабораторные испытания одиннадцати серий железобетонных узлов конструкций из тяжелого, высокопрочного тяжелого и легкого бетонов; девять серий опытных образцов крестообразных узлов габаритными размерами  $800 \times 900$  мм и две серии пересекающихся стен габаритными размерами  $1300 \times 1300$  мм.

Опытные конструкции испытываются в вертикальном положении (со свободным доступом к растянутой зоне), что дает возможность тщательно изучить картину образования, развития и раскрытия трещин. Испытательный стенд позволяет реализовать проверяемые схемы нагружения.

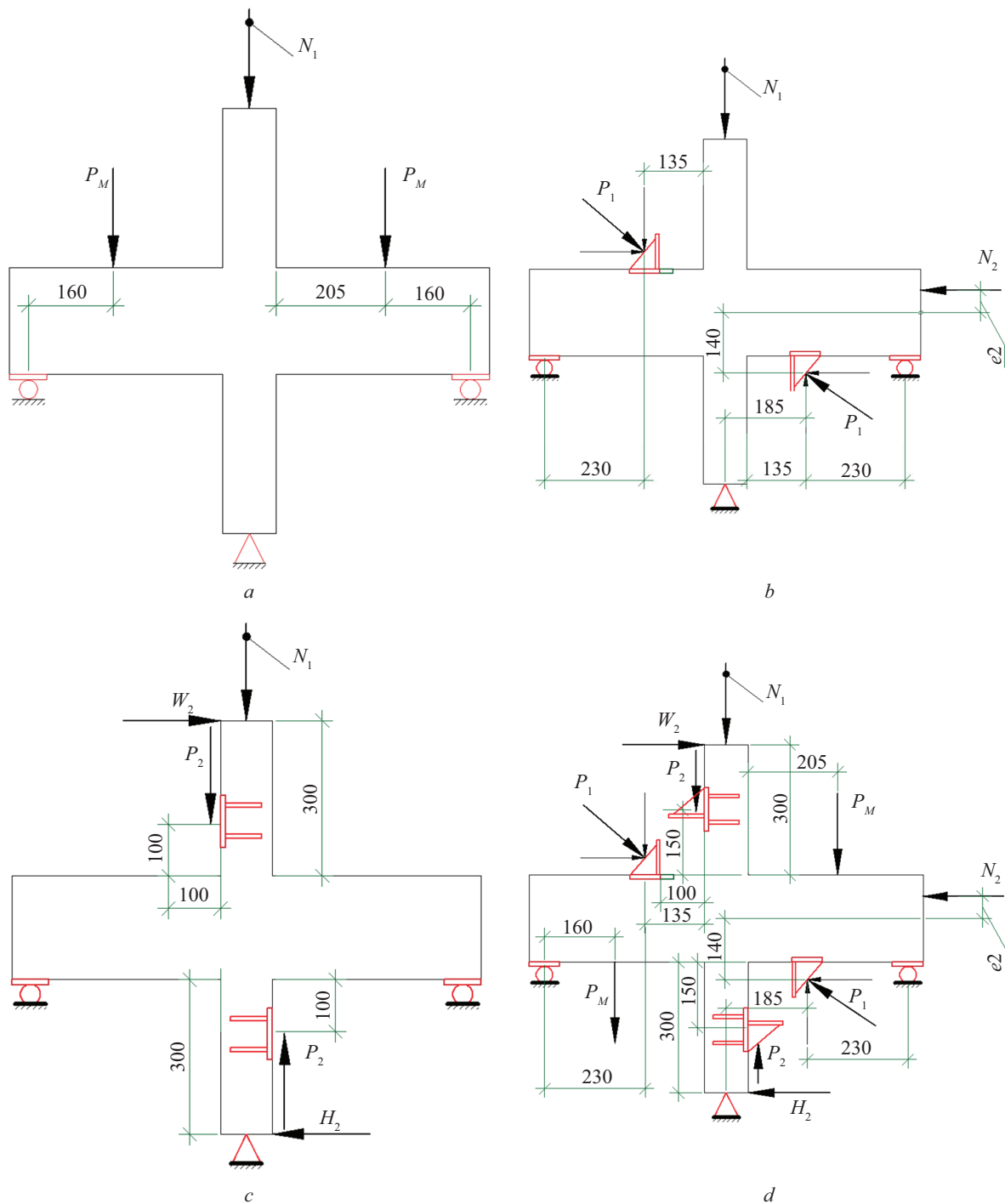
Схемы нагружения железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений приведены на рис. 3. В зависимости от вида соединения ригеля с колонной, вида воздействия и вида бетона приняты следующие обозначения серий опытных конструкций:

- шифр для серий «У-И-РСН-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; И — изгиб; тб — тяжелый бетон с изгибающим моментом, приложенным к ригелю (2 шт.);
- шифр серии «У-В-РСН-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; тб — тяжелый бетон с учетом дополнительной горизонтальной силы в колонне, которая возникает от значительных деформационных смещений колонны от экстремальных природных и техногенных воздействий (2 шт.);
- шифр серии «У-Т-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; Т — горизонтальная сила, приложенная к ригелю; тб — тяжелый бетон. Основным предметом исследования будет оценка влияния сдвиговых деформаций в уровне ригеля (2 шт.);
- шифр серий опытных образцов и «У-И-Т-тб» (1 шт.) и серия «У-И-В-тб» (1 шт.). Образцы моделируют совместное действие изгиба и горизонтальных воздействий в ригеле и колонне соответственно.

В шестой серии «У-Сум-РСН-тб» (1 шт.) рассматривается совместное действие всех обозначенных ранее силовых и деформационных воздействий.

Седьмая «У-И-РСН-вл»: У — узловое соединение ригеля и колонны; И — изгиб; вл — высокопрочный легкий бетон (2 шт.).

Восьмая «У-В-РСН-вл»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила,



**Рис. 3.** Схема нагружения конструкции опытных образцов при изгибе (а); воздействии сдвигающей силы на ригели (b); сдвигающей силы на колонны (с); суммарном воздействии изгиба, сдвигающих сил в ригеле и колонне (d)

**Fig. 3.** Loading scheme of the experimental specimen structure under bending (a); shear force on beams (b); shear force on columns (c); total effect of bending, shear forces in the beam and column (d)

приложенная к колонне; вл — высокопрочный легкий бетон (1 шт.). Серии аналогичны первой и второй с той разницей, что выполнены из высокопрочного легкого бетона.

Девятая серия моделей узловых соединений «У-В-РСН-вт»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; вт — высокопрочный тяжелый бетон,

аналогична второй и шестой, но выполнена из высокопрочного тяжелого бетона (2 шт.).

Образцы серии 10 и 11 направлены на изучение крестообразных пересечений монолитных участков стен, изготовленных из высокопрочного легкого бетона и подверженных действию изгибных (серия «С-И-РСН-вл» — 2 шт.) и сдвиговых воздействий (серия «С-И-РСН-вл» — 2 шт.).

Объем и характеристики экспериментальных конструкций узловых соединений  
Volume and characteristics of experimental designs of nodal connections

Номер серии Series Number	Шифр фрагментов Fragment cipher	Схема испытаний Test scheme	Проектные размеры, мм Design dimensions, mm			Класс бетона Concrete class	Тип бетона Type of concrete	Арматура Reinforcement		Количество, шт. Quantity, pes.
			высота/ширина, мм height/width, mm	размеры колонны (b × h), мм column dimensions (b × h), mm	размеры ригеля (b × h), мм crossbar dimensions (b × h), mm			Продольная Longitudinal	Поперечная Transverse	
1	У-И-РСН-тб	Рис. 2, а Fig. 2, a	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A40C	2
2	У-В-РСН-тб	Рис. 2, с Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	2
3	У-Т-тб	Рис. 2, b Fig. 2, b	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A 240C	2
4	У-И-Т-тб	Рис. 2, a, b Fig. 2, a, b	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
5	У-И-В-тб	Рис. 2, a, c Fig. 2, a, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
6	У-Сум-РСН-тб	Рис. 2, d Fig. 2, d	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
7	У-И-РСН-вл	Рис. 2, a Fig. 2, a	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
8	У-В-РСН-вл	Рис. 2, c Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	1
9	У-В-РСН-вт	Рис. 2, c Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B100	Высокопрочный тяжелый High strength heavy	A240C	A240C	2
10	С-И-РСН-вл	Рис. 1, b Fig. 1, b	1300 × 1300	80 × 400	80 × 400	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
11	С-Т-РСН-вл	Рис. 1, b Fig. 1, b	1300 × 1300	80 × 400	80 × 400	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
Bcero / Total										18

Примечание: шифр конструкции включает: У — узловое соединение ригеля и колонны; С — узел пересечения стеной; И — изгиб; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; Т — горизонтальная сила, приложенная к ригелю; Сум — суммарное воздействие изгиба, сдвига в колонне и ригеле; РСН — расчетное сочетание нагрузок (собственный вес, постоянная (оборудование и эксплуатационных нагрузок)), временная нагрузка — ветер, снег, сейсмика и неравномерные осадки грунтов, а также РСУ в зданиях и сооружениях; тб — тяжелый бетон; вл — высокопрочный легкий бетон; вт — высокопрочный тяжелый бетон. Арматура поперечных хомутов Ø6 мм А240С раскатывалась из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести).

Note: the design code includes: N — nodal connection of the beam and column; W — wall intersection node; B — bending; V — horizontal force applied to the column; T — horizontal force applied to the beam; Tot — total effect of bending, shear in the column and beam; DCL — design combination of loads (self-weight, permanent (equipment and operational loads)), temporary load — wind, snow, seismicity and uneven soil settlements, as well as CCE in buildings and structures; HC — heavy concrete; HL — high-strength lightweight concrete; HH — high-strength heavy concrete. The reinforcement of the transverse stirrups Ø6 mm A240C was rolled out of a coil manually, and not using rollers (to avoid stretching at the yield point).

Объем и характеристики экспериментальных конструкций узловых соединений представлены в таблице.

Схемы установки измерительных приборов

Учитывая, что исследования такого дифференциального параметра, как ширина раскрытия трещин, проводятся в том числе и с позиции механики разрушения, то это учитывается и находит отражение в методике проведения эксперимента. В частности, электротензорезисторы в виде розеток, образованных четырьмя датчиками под углом 45°, устанавливались в фибровых волокнах и в сжатой зоне бетона, расположенной под концом опасной пространственной трещины (рис. 4).

Целью установки этих электротензорезисторов является определение фибровых и главных деформаций в сжатой зоне бетона, прилегающей к концу опасной пространственной трещины (в окрестности расчетных сечений I–I (группы тензорезисторов 10, 11) и сечения III–III (группы тензорезисторов 1, 4, 8 и 2, 6, 9), проходящего через конец пространственной трещины). Размещение на опытных конструкциях зон установки электротензорезисторов с базой 30 мм на бетон показано на рис. 3, а. Группы датчиков 3 и 7 размещены для оценки деформативности в уровне поперечной арматуры колонн, последняя группа тензорезисторов 5 расположена в геометрическом центре пересечения осей ригеля и колонны с целью извлечения информации о деформировании каждого опытного образца с доведением его до разрушения. Нагружение ЖБК будет проводиться плавно, небольшими ступенями,

составляющими  $0,1 M_{cre}, q_{cre}$ . После образования трещин на бетон по ее берегам будет установлена группа тензорезисторов для замера деформаций в непосредственной близости от трещины — зоне, где проявляется деформационный эффект железобетона (рис. 5).

Наибольший интерес представляет характер трещинообразования узловой зоны, ограниченный гранями ригеля и колонны (РМС-3). На рис. 6, а показаны координаты, по которым отслеживается пространственная трещина.

Также на стороне Б узлового соединения полностью отсутствуют измерительные приборы, для фиксации характера образования и раскрытия трещин устанавливается камера высокого разрешения со скоростью записи 240 кадров в секунду (рис. 6, б, с). Для измерения линейных перемещений и углов поворота размещаются прогибомеры часового типа, а также «мишени-ловушки», установленные в характерных точках опытной конструкции (рис. 6, д).

С целью контроля и подтверждения изучаемой модели деформирования рассматриваемых конструкций предусмотрена также система механических приборов для измерения деформаций контрольных точек, характеризующих сложное НДС узлов железобетонных конструкций (см. рис. 4, б).

Обработка показаний электротензорезисторов при плоском напряженном состоянии характеризуется величинами главных деформаций  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , а также углом  $\phi$  между направлением  $\epsilon_1$  и другим известным базовым направлением. Показания розеток электротензорезисторов определяются в процессе

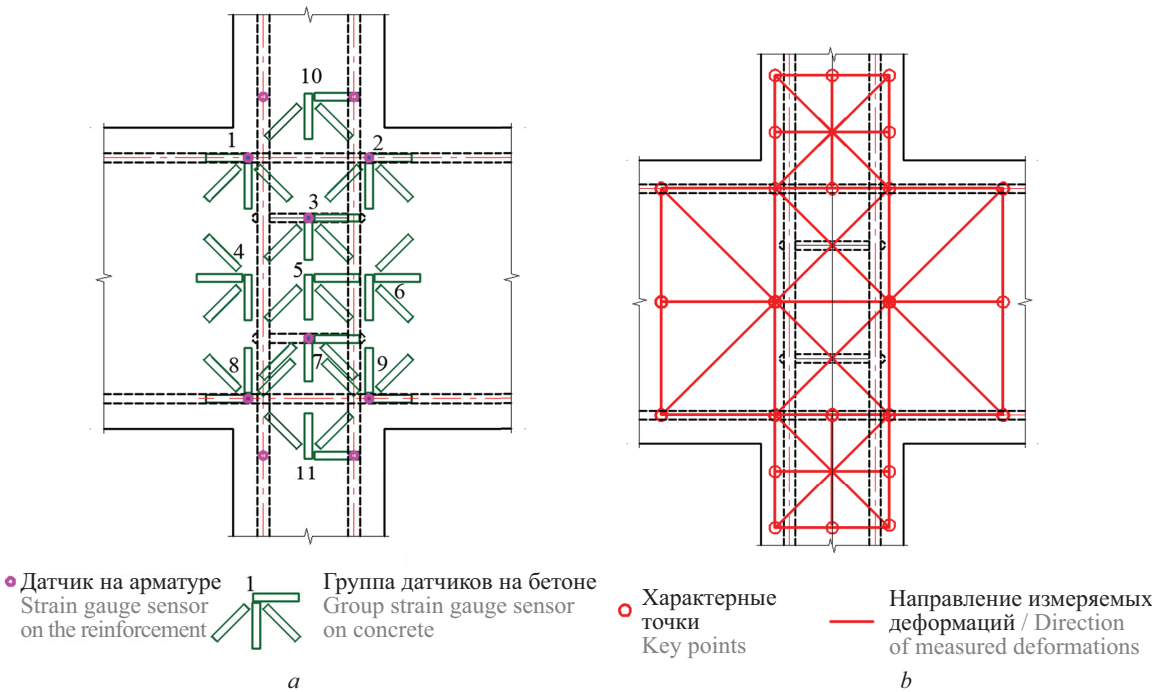
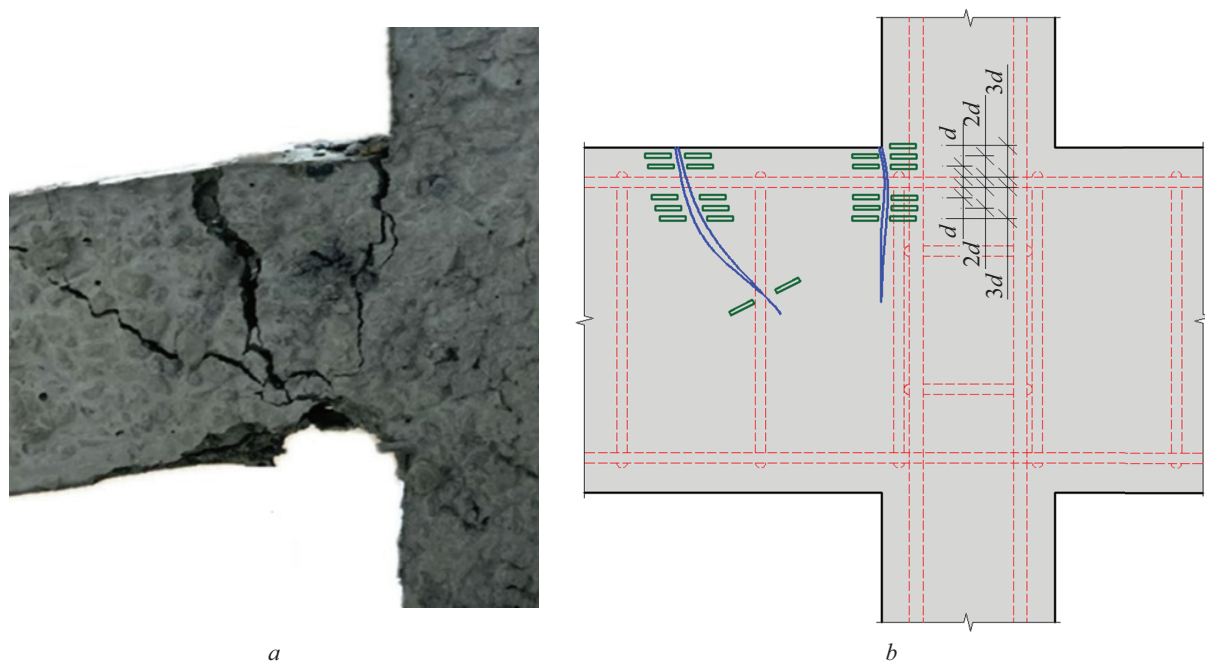


Рис. 4. Схема расположения групп электротензорезисторов на прямой стороне (а) опытных образцов узлов и схема размещения характерных точек для оценки деформативности узлового соединения (б)

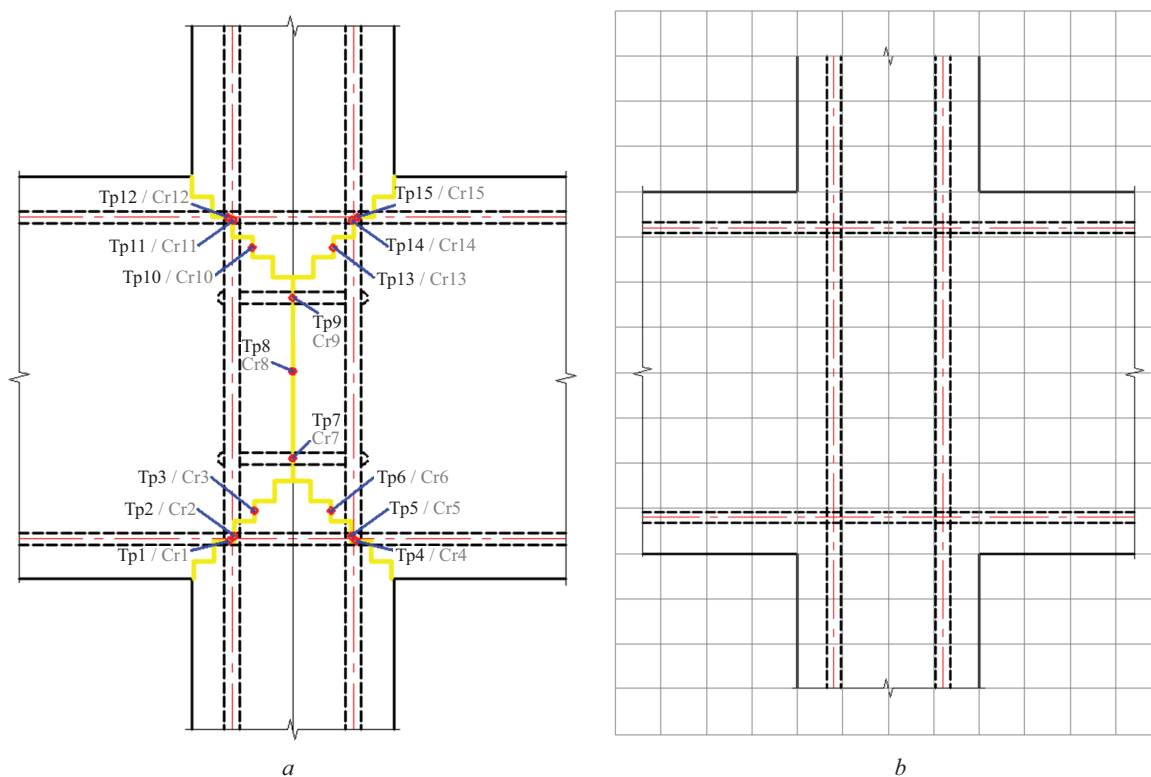
Fig. 4. The layout of the groups of electrical strain gauges on the straight side (a) of the experimental specimens of the nodes, the layout of the characteristic points for assessing the deformability of the nodal connection (b)





**Рис. 5.** Характер разрушения узловой зоны [21] и схема установки тензодатчиков для оценки деформационного эффекта железобетона

**Fig. 5.** Nature of destruction of the nodal zone [21] and the scheme of installation of strain gauges for assessing the deformation effect of reinforced concrete



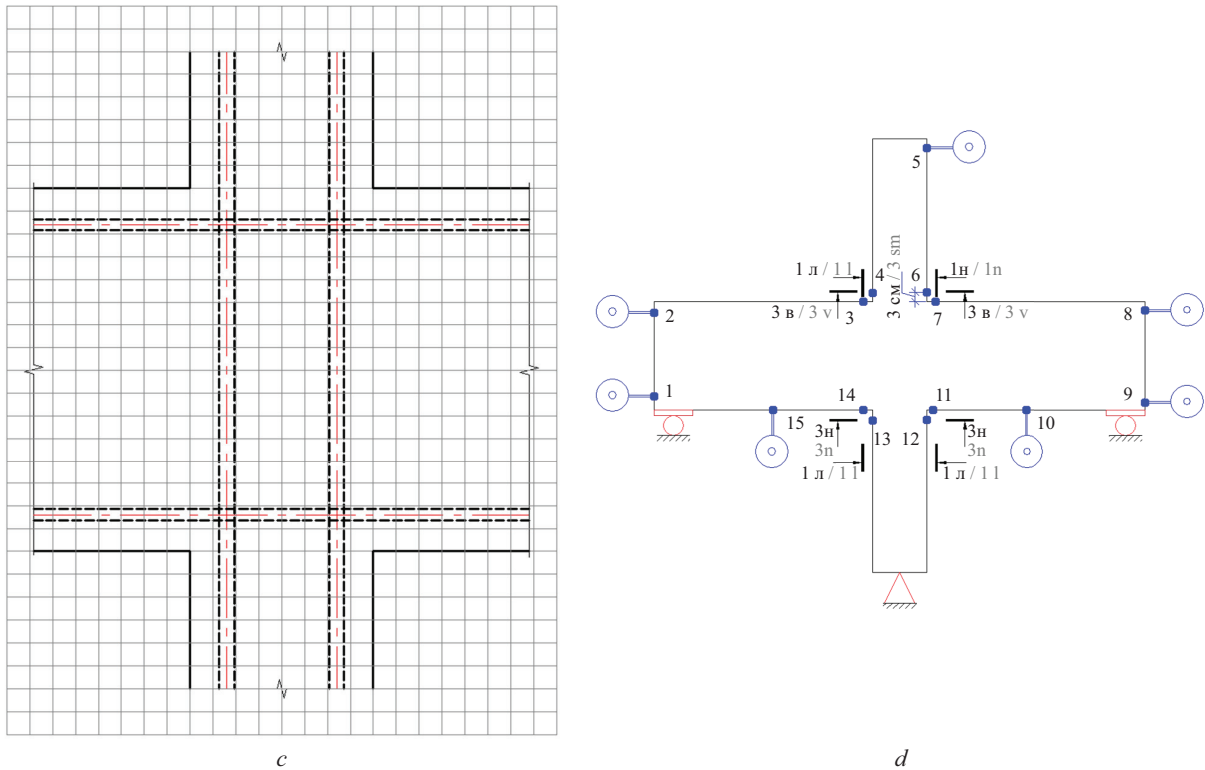


Рис. 6. Характерные точки измерения ширины раскрытия трещин:  $a_{cr}$  и  $\Delta a_{cr}$  (a); общий вид обратной стороны образца для фиксации параметров развития и раскрытия трещин в железобетонных конструкциях на основе оптических измерений (b, c); «мишени-ловушки» для фиксации линейных и угловых перемещений (d)

Fig. 6. Characteristic points for measuring the crack opening width:  $a_{cr}$  and  $\Delta a_{cr}$  (a); general view of the reverse side for recording the parameters of crack kinematics in reinforced concrete structures based on optical measurements (b, c); “target traps” for recording linear and angular displacements (d)

эксперимента для получения значений деформаций при следующих соотношениях нагрузок  $P_i/P_{\max} = 0,4; 0,6; 0,8; 1$  по следующим зависимостям:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$  — значения деформаций бетона для тензорезисторов, расположенных под углами 0, 45 и 90° к продольной оси образца соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ экспериментальных исследований как авторского коллектива, так и широкого круга исследователей в области деформирования ЖБК позволил спланировать экспериментальные исследования по изучению особенностей трещинообразования, деформирования и разрушения узлов и стен рамных ЖБК, с учетом различного вида и характера НДС. Выполнено обоснование принятых конструктивных решений опытных конструкций узлов и разработана программа и методика проведения экспериментальных исследований рассматриваемых типов узловых соединений, которая дает возможность экспериментально выявить новые закономерности и особенности действительной работы указанного вида железобетонных конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Анализ деформирования и трещинообразования многоэтажных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий в предельных и запредельных состояниях // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 8–13. EDN XACMTX.

2. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and Failure of a Monolithic Reinforced Concrete Frame under Accidental Actions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037. EDN HBZKBR.

3. Бу Н.Т. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 4 (90). С. 73–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84. EDN OREECE.
4. Колчунов В.И., Кореньков П.А., Фан Динь Гуок. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 11. С. 1462–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472. EDN ZBNMY.
5. Nadir W., Ali A.Y., Jawdhari A., Kadhim M.M.A., Majdi A. Cyclic behavior of UHPC corner beam-column joints under bi-directional bending // *Structures*. 2024. Vol. 60. P. 105857. DOI: 10.1016/J. ISTRUC. 2024.105857
6. Palomo I.R.I., Frappa G., de Almeida L.C., Trautwein L.M., Pauletta M. Analytical and numerical models to determine the strength of RC exterior beam-column joints retrofitted with UHPFRC // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 312. P. 118244. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.118244
7. Mitra N., Lowes L.N. Evaluation, Calibration, and Verification of a Reinforced Concrete Beam–Column Joint Model // *Journal of Structural Engineering*. 2007. Vol. 133. Issue 1. Pp. 105–120. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(105)
8. Hou S., Shi D., Fan J., Wu T., Sun W., Wu G. et al. Comparative study on failure mechanism of full-scale precast and cast-in-place beam-column joints based on acoustic emission technology // *Structures*. 2024. Vol. 65. P. 106629. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106629
9. Selim M., Khalifa R., Elshamy E., Zaghlal M. Structural efficiency of fly-ash based concrete beam-column joint reinforced by hybrid GFRP and steel bars // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e02927. DOI: 10.1016/J. CSCM.2024.E02927
10. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Петряшев Н.О., Петряшев С.О., Негрозов О.А. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций высотного здания с учетом фактического положения железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2015. № 4. С. 50–68. EDN TPKOQP.
11. Yang R., Luo K.H., Huang S.M., Qiao Y.M. Influence of column-to-beam flexural modulus ratio on the failure mode of RC frame inner joints: Theoretical analysis and experimental investigation // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 108105. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.108105
12. Cosgun C., Turk A.M., Mangir A., Cosgun T., Kiyamaz G. Experimental behaviour and failure of beam-column joints with plain bars, low-strength concrete and different anchorage details // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 109. P. 104247. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104247
13. Hu G., Zhang Z., Cao B., Pan Z., Zeng L. Seismic behavior of precast concrete beam-column joints with bending moment-shear separation controllable plastic hinge // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 304. P. 117585. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.117585
14. Kalogeropoulos G., Tsonos A.D., Iakovidis P. Hysteresis Behavior of RC Beam–Column Joints of Existing Substandard RC Structures Subjected to Seismic Loading–Experimental and Analytical Investigation // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1609. DOI: 10.3390/buildings14061609
15. Mao W.H., Liu J.P., Qi H.T., Nishiwaki T., Ding Y. Anchorage characteristics and their impacts on the seismic performance of HECC/RC composites external beam-column joint // *Structures*. 2024. Vol. 63. P. 106469. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106469
16. Tong Z., Xu L., Wei C., Chi Y., Huang L. Upgrading seismic performance of beam-column joints using steel-polypropylene hybrid fiber: Experiment and numerical simulation // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. P. 108681. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.108681
17. Zhang X., Li B. Investigation on effect of ECC coverage condition on seismic behavior of beam-column joint // *Structures*. 2024. Vol. 62. P. 106195. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106195
18. Patel P., Desai A., Bid S., Desai P. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 411. P. 134511. DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT.2023.134511
19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 290–297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.
20. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. Issue 3 (47). Pp. 6–26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001. EDN LOHTQP.
21. Федорова Н.В., Колчунов В.И., Бушова О.Б. Расчет параметров деформирования железобетонных рам при разрушении ригелей по наклонному сечению // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 2 (106). С. 90–100. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-90-100. EDN TPMSGY.

Поступила в редакцию 10 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 15 июня 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Владимир Иванович Колчунов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3990-0345, Scopus: 57219135548, ResearcherID: S-7792-2016, ORCID: 0000-0001-5075-1134; vlik52@mail.ru;

Павел Анатолиевич Кореньков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa\_gbk@mail.ru;

Наталья Витальевна Федорова — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57196437054, Researcher ID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfmgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Fedorova N.V., Korenkov P.A. Analysis of deformation and crack formation of multistory monolithic reinforced concrete frame-bar structural systems under limit and beyond-limit conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 11:8-13. EDN XACMTX. (rus.).
2. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and Failure of a Monolithic Reinforced Concrete Frame under Accidental Actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037. EDN HBZKBR.
3. Vu N.T. Study of survivability of reinforced concrete constructive nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic formulation. *Building and Reconstruction*. 2020; 4(90):73-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84. EDN OREECE. (rus.).
4. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Phan Dinh Quoc. A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(11):1462-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472. EDN ZBNYMY. (rus.).
5. Nadir W., Ali A.Y., Jawdhari A., Kadhimi M.M.A., Majidi A. Cyclic behavior of UHPC corner beam-column joints under bi-directional bending. *Structures*. 2024; 60:105857. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.105857
6. Palomo I.R.I., Frappa G., de Almeida L.C., Trautwein L.M., Pauletta M. Analytical and numerical models to determine the strength of RC exterior beam-column joints retrofitted with UHPFRC. *Engineering Structures*. 2024; 312:118244. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.118244
7. Mitra N., Lowes L.N. Evaluation, Calibration, and Verification of a Reinforced Concrete Beam-Column Joint Model. *Journal of Structural Engineering*. 2007; 133(1):105-120. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(105)
8. Hou S., Shi D., Fan J., Wu T., Sun W., Wu G. et al. Comparative study on failure mechanism of full-scale precast and cast-in-place beam-column joints based on acoustic emission technology. *Structures*. 2024; 65:106629. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106629
9. Selim M., Khalifa R., Elshamy E., Zaghlat M. Structural efficiency of fly-ash based concrete beam-column joint reinforced by hybrid GFRP and steel bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e02927. DOI: 10.1016/J. CSCM.2024.E02927
10. Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Petryashev N.O., Petryashev S.O., Negrozov O.A. Strength and Stability Analysis of Load-Bearing Structures of a High-Rise Building with Account for Actual Positions of Reinforced Concrete Structural Members. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 4:50-68. EDN TPKOQP. (rus.).
11. Yang R., Luo K.H., Huang S.M., Qiao Y.M. Influence of column-to-beam flexural modulus ratio on the failure mode of RC frame inner joints: Theoretical analysis and experimental investigation. *Structures*. 2025; 71:108105. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.108105
12. Cosgun C., Turk A.M., Mangir A., Cosgun T., Kiyimaz G. Experimental behaviour and failure of beam-column joints with plain bars, low-strength concrete and different anchorage details. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 109:104247. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104247



13. Hu G., Zhang Z., Cao B., Pan Z., Zeng L. Seismic behavior of precast concrete beam-column joints with bending moment-shear separation controllable plastic hinge. *Engineering Structures*. 2024; 304:117585. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.117585
14. Kalogeropoulos G., Tsonos A.D., Iakovidis P. Hysteresis Behavior of RC Beam–Column Joints of Existing Substandard RC Structures Subjected to Seismic Loading–Experimental and Analytical Investigation. *Buildings*. 2024; 14(6):1609. DOI: 10.3390/buildings-14061609
15. Mao W.H., Liu J.P., Qi H.T., Nishiwaki T., Ding Y. Anchorage characteristics and their impacts on the seismic performance of HECC/RC composites external beam-column joint. *Structures*. 2024; 63:106469. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106469
16. Tong Z., Xu L., Wei C., Chi Y., Huang L. Upgrading seismic performance of beam-column joints using steel-polypropylene hybrid fiber: Experiment and numerical simulation. *Journal of Building Engineering*. 2024; 86:108681. DOI: 10.1016/J. JOBE.2024.108681
17. Zhang X., Li B. Investigation on effect of ECC coverage condition on seismic behavior of beam-column joint. *Structures*. 2024; 62:106195. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106195
18. Patel P., Desai A., Bid S., Desai P. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134511. DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT.2023.134511
19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(4):290-297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCQ.
20. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 3(47):6-26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001. EDN LOHTQP.
21. Fedorova N.V., Kolchunov V.I., Bushova O.B. Calculation of parameters of deformation of reinforced concrete frames during the destruction of crossbars along an inclined section. *Building and Reconstruction*. 2023; 2(106):90-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-90-100. EDN TPMSGY. (rus.).

Received April 10, 2025.

Adopted in revised form on April 15, 2025.

Approved for publication on June 15, 2025.

**B I O N O T E S :** **Vladimir I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling, Corresponding Member of RAACS; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3990-0345, Scopus: 57219135548, ResearcherID: S-7792-2016, ORCID: 0000-0001-5075-1134; vlik52@mail.ru;

**Pavel A. Korenkov** — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa\_gbk@mail.ru;

**Natalia V. Fedorova** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering, Advisor of RAACS; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57196437054, Researcher ID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfngsu.ru.

*Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*

Определение опасного ослабления поперечного сечения  
металлической дымовой трубы

Юрий Борисович Филатов, Оксана Юрьевна Сапожникова  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

**Введение.** Предлагается простой подход к определению опасного ослабления поперечного сечения металлических дымовых труб, неизбежно возникающего из-за агрессивного действия дымовых газов. Учитывая, что по некоторым оценкам, приведенным в интернете, в России эксплуатируется порядка 107 тысяч дымовых труб, указанная задача представляется актуальной.

**Материалы и методы.** Объект исследования — реальная дымовая труба, эксплуатируемая в г. Москве в течение более 20 лет, состоящая из шести цилиндрических оболочек — царг. В результате коррозионного износа площади поперечного сечения оболочек снизились в разной степени, вследствие чего возникла опасность потери устойчивости хотя бы одной из царг. Устойчивость цилиндрической оболочки, подвергнутой совместному действию изгибающего момента и сжимающей продольной силы, исследовалась на основе подходов, описанных в научнотехнической литературе. Поскольку в расчет закладывалась фактическая толщина оболочки, ее коррозионный износ оказывается уже учтенным.

**Результаты.** В результате проведенных расчетов получена простая формула, определяющая условную критическую толщину поперечного сечения наиболее ослабленной царги. Данное ослабление сечения требует принятия инженерных или управленческих решений для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации трубы. Полученное решение применимо на относительно ранних этапах эксплуатации дымовых труб. По мере развития деформаций трубы, обусловленных не только действием эксплуатационной нагрузки, но также и другими причинами, растяжки трубы переходят в состояние текучести. Исследование напряженно-деформированного состояния системы «ствол трубы — растяжки» в этих условиях может быть продолжением настоящей работы.

**Выводы.** Выявление условной критической толщины при плановом обследовании трубы, установленном соответствующими нормативными документами, не означает необходимости вывода трубы из эксплуатации, или ее усиления. В этом случае следует по определенным в ходе обследования толщинам стенок провести расчет по описанной в данной статье методике, вычислить реальные величины изгибающего момента продольной силы в опасных сечениях и вновь проверить устойчивость трубы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дымовая труба, устойчивость, цилиндрическая оболочка, ослабление поперечного сечения, растяжка, направление ветра, критическое напряжение, перемещения

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Филатов Ю.Б., Сапожникова О.Ю. Определение опасного ослабления поперечного сечения металлической дымовой трубы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1178–1186. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1178-1186

Автор, ответственный за переписку: Юрий Борисович Филатов, yuryfil50@yandex.ru.

Determination of dangerous weakening  
of the metal chimney cross-section

Yury B. Filatov, Oksana Yu. Sapozhnikova  
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

**Introduction.** A simple approach is proposed to determine the dangerous weakening of the cross-section of metal chimneys, which inevitably occurs due to the aggressive action of flue gases. Considering that, according to some estimates provided on the Internet, about 107,000 chimneys are in operation in Russia, this task seems to be quite relevant.

**Materials and methods.** The object of the study was a real chimney, operated in Moscow for more than 20 years, consisting of six cylindrical shells. As a result of corrosion wear, the cross-sectional areas of the shells decreased to varying degrees, as a result of which there was a danger of loss of stability of at least one of the shells. The stability of a cylindrical shell subjected to the combined action of a bending moment and a compressive longitudinal force was investigated based on the approaches described in the scientific and technical literature. Since the actual thickness of the shell was included in the calculation, its corrosion wear is already taken into account.

**Results.** As a result of the calculations, a simple formula was obtained that determines the conditional critical thickness of the cross-section of the most weakened shell. This weakening of the section requires engineering or management deci-

sions to ensure further safe operation of the pipe. It is noted that the solution obtained is applicable at relatively early stages of chimney operation. As pipe deformations develop, due not only to the effect of the operating load, but also for other reasons, the pipe stretches go into a state of fluidity. The study of the stress-strain state of the “pipe trunk – extension” system under these conditions can be a continuation of the present work.

**Conclusions.** The identification of a conditional critical thickness during a routine inspection of the pipe, established by the relevant regulatory documents, does not mean that the pipe must be decommissioned or reinforced. In this case, according to the wall thicknesses determined during the examination, the calculation should be carried out according to the methodology described in this article, the actual values of the bending moment of the longitudinal force in dangerous sections should be calculated, and the stability of the pipe should be checked again.

**KEYWORDS:** chimney, stability, cylindrical shell, weakening of the cross-section, extension, wind direction, critical stress, displacement

**FOR CITATION:** Filatov Yu.B., Sapozhnikova O.Yu. Determination of dangerous weakening of the metal chimney cross-section. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1178-1186. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1178-1186 (rus.).

Corresponding author: Yury B. Filatov, yuryfil50@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени существует большое количество исследований, посвященных тем или иным аспектам потери устойчивости цилиндрических оболочек. В формате статьи возможно привести ссылки на некоторые классические<sup>1, 2, 3, 4</sup> и современные [1, 2] работы как теоретического, так и экспериментального<sup>5, 6</sup>, а также теоретико-экспериментального характера [3, 4], только в качестве примеров. Имеется значительное число исследований, в которых анализируются отдельные, довольно многочисленные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние (НДС) и продолжительность жизненного цикла (ЖЦ) дымовых металлических труб [5–15]. Отдельно можно выделить работы, касающиеся потери устойчивости дымовых труб [16, 17].

В данной работе рассматривается узкопрактическая задача — предлагается простой подход к определению опасного ослабления поперечного сечения металлических дымовых труб, неизбежно возникающего из-за агрессивного действия дымовых газов.

Непосредственным поводом для исследования стал расчет реальной дымовой трубы, эксплуатируемой в г. Москве в течение более 20 лет (рис. 1).

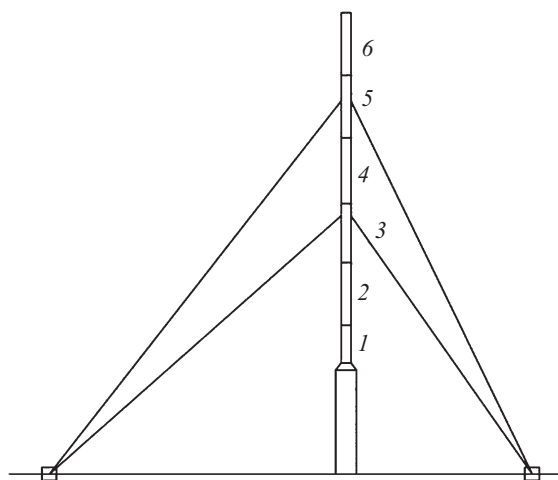


Рис. 1. Схема дымовой трубы с растяжками в двух этажах  
Fig. 1. Diagram of a chimney with extensions in two floors

Обследование трубы, состоящей из шести (не считая переходной) цилиндрических оболочек — царг длиной от 4,26 до 7,44 м, ультразвуковым толщиномером Novotest УТ-1М выявило ослабление поперечных сечений с первоначальных толщин, равных 7, до 2,7 мм и с 6 до 1,9 мм. Данное обстоятельство дало основание для проверки возможной потери местной устойчивости. Учитывая, что по некоторым оценкам, приведенным в интернете, в России эксплуатируется порядка 107 тысяч дымовых труб, указанная задача представляется актуальной.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе Э.И. Григолюка и В.В. Кабанова [18] отмечается, что классическая формула Лоренца – Тимошенко

$$\sigma_{кр} = 0,605E \left( \frac{\delta}{R} \right) \quad (1)$$

является самым показательным примером с точки зрения несоответствия теоретических решений большинству экспериментальных данных, начиная с работ У. Лилли, А. Маллока и до современных. Основную причину таких несоответствий боль-

<sup>1</sup> Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М., Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1949. 784 с.

<sup>2</sup> Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Наука, 1967.

<sup>3</sup> Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М. : Гостехиздат, 1955. 476 с.

<sup>4</sup> Цурков И.С. Упругое напряженное состояние произвольно нагруженной замкнутой цилиндрической оболочки // Известия АН СССР: отделение технических наук. 1951. № 2.

<sup>5</sup> Lilly W.E. The design of columns and struts // Engineering. 1908. Vol. 85.

<sup>6</sup> Mallock A. Note on the Instability of Tubes Subjected to End Pressure, and on the Folds in a Flexible Material // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1908. Vol. 81. No. A-549.

шинство авторов определяют как влияние отклонений от строгой цилиндрической формы испытуемых образцов, и это при действии только осевого сжатия. Естественно, что применение этих формул для расчета дымовых труб, подверженных действию еще и ветровой нагрузки, не может привести к сколько-нибудь достоверному результату. К этому следует добавить и целый ряд факторов, влияющих на НДС дымовых труб. К этим факторам, подробно рассмотренным в работе Е.Н. Оленич [19], относятся: разрушение антикоррозионного покрытия; разрушение элементов фундамента; эксцентриситет стыковки царг; коррозионный износ стенки ствола; локальный коррозионный износ лацменных узлов; трещины в основном металле, швах и околшовной зоне; крен ствола трубы в целом; ослабление натяжения растяжек. В этих условиях построение зависимостей параметров НДС трубы в течение всего ее ЖЦ от величин действующих нагрузок представляется бесперспективным. С другой стороны, для решения поставленной задачи — определения степени коррозионного износа отдельной царги, которую в строгом смысле слова нельзя назвать критической, но требующей принятия каких-либо инженерных или управленческих решений, таких зависимостей и не надо. Действует ряд нормативных документов<sup>7, 8</sup>, устанавливающих периодичность обследования дымовых труб. По результатам этих обследований устанавливаются фактические толщины царг и прогибы трубы, в том числе в уровнях сопряжения царг. Таким образом, задача может быть сведена к расчету на устойчивость царги, работающей в наиболее невыгодных соотношениях «толщина – сжимающие напряжения». Такое представление вполне согласуется с опытами Б.О. Алмрота, А.М. Холмса и Д.О. Браша [20], в которых скоростная съемка показала, что выпучивание цилиндрической оболочки начинается с места максимальной неправильности или какого-либо дефекта. Поскольку в расчет закладывается фактическая толщина оболочки, ее коррозионный износ оказывается уже учтенным. Прочие факторы, перечисленные в работе Е.Н. Оленич [19], развиваются на более поздних стадиях ЖЦ трубы и в настоящей работе не рассматриваются в связи с обстоятельствами, о которых будет сказано далее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Устойчивость цилиндрических оболочек, подвергнутых совместному действию изгибающего момента и сжимающей продольной силы, рассмотрена

<sup>7</sup> О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ.

<sup>8</sup> Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» : утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.11.2013 № 538.

в работах А.С. Вольмира и более подробно Э.Л. Аксельрада [21]. В последней для определения критического напряжения была предложена формула:

$$\left( \frac{M_* R}{I} \right) + \left( \frac{N_*}{F} \right) = \left( E \frac{\delta}{R} \right) \frac{(p_{0*} + (p_* - p_{0*})) \sigma_m}{\sigma_m + \sigma_n}, \quad (2)$$

где  $M_*$ ,  $N_*$  — критические значения изгибающего момента и продольной силы (приложенных в сечении одновременно);  $p_{0*}$ ,  $p_*$  — параметры критической продольной силы и критического изгибающего момента:

$$p_{0*} = \frac{\chi_0}{(3(1-\nu^2))^{\frac{1}{2}}}; \quad p_* = \frac{M_*^0}{(12(1-\nu^2))^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

где  $M_*^0$  — критическое значение параметра изгибающего момента;  $\nu$  — коэффициент Пуассона. Величина  $p_*$  определяется в зависимости от длины трубы, ее кривизны и начальных неправильностей по графикам, приведенным в указанной монографии.

Величины  $\chi$  и  $\chi_0$  учитывают влияние на критическое напряжение осевого сжатия трубы и осесимметричных начальных неправильностей ее формы.

Приведенная задача, с одной стороны, упрощается тем, что устойчивость каждой царги вследствие наличия фланцевых соединений можно рассматривать отдельно от остальных царг, как оболочки средней длины. С другой стороны, задача осложняется тем, что, как показали замеры толщин поперечных сечений, в ослаблении последних не прослеживается какой-либо зависимости от высоты расположения царг. Кроме того, в различных точках, где замеры производились в пределах одной царги, толщины поперечных сечений варьировались от 32 до 97 % от первоначальных.

Ветровая нагрузка была определена по СП «Нагрузки и воздействия»<sup>9</sup>. Поскольку труба раскреплена шестью растяжками разной длины, расположенными в двух уровнях, обозначенных ниже, как  $H_1$  (верхний уровень растяжек) и  $H_2$  (нижний уровень растяжек), расчет осуществлялся в предположении нескольких направлений действия ветровой нагрузки. Данное обстоятельство объясняется тем, что места крепления растяжек к земле определялись условиями местности. Растяжки II и III расположены под углами 45° к растяжке I. Также все растяжки имеют разные длины и углы наклона к земле.

Рассматривалось направление ветра к растяжке I и обратно, к растяжке II и обратно, к растяжке II и обратно под углами 22,5° к ней, к растяжке III под углом 22,5° к ней и от растяжки III под нулевым углом к ней. В каждом случае величины усилий в растяжках и соответственно величины изгибающих моментов и продольных сил оказывались различными. Расчет

<sup>9</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\* : утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр (ред. от 30.12.2020).



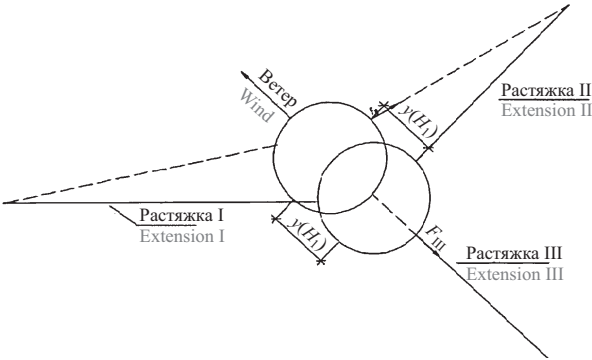


Рис. 2. Расчетное направление ветра  
Fig. 2. Estimated wind direction

показал, что наиболее опасным является последнее направление ветра (рис. 2).

Сплошными линиями на рис. 2 показано проектное положение растяжек, пунктиром — положение, которое они принимают в результате действия ветровой нагрузки. Подавляющая часть нагрузки приходится на растяжку III. Растяжка II не выключается из работы полностью, как растяжка I, но усилие в ней вследствие ее малого удлинения по сравнению с удлинением растяжки III составляет не более десятых долей процента от усилия в растяжке III. Расчеты продемонстрировали, что изгибающие моменты в трубе допустимо определять от совместного действия ветровой нагрузки и горизонтальных составляющих усилий в растяжках. Строго говоря, при расчете по деформированной схеме в величины моментов в любом сечении, кроме верхнего, входят слагаемые, зависящие и от вертикальных составляющих усилий в растяжках, и от собственного веса части трубы, расположенной выше рассматриваемого сечения. Однако, по крайней мере в рассмотренных конкретных примерах, расчеты показали, что даже при максимальных прогибах трубы, соответствующих расчету по минимальным измеренным толщинам, эти составляющие не превышают 0,56 % от суммарных моментов от действия ветровой нагрузки и горизонтальных составляющих усилий в растяжках.

Задача, таким образом, сводится к следующей. Прогибы и углы наклона сечений каждой царги определяются уравнениями:

$$EI_i y(x) = \psi(x) + C_i x + C_{i+1}; \quad (4)$$

$$EI_i \varphi(x) = \Phi(x) + C_i, \quad (5)$$

где

$$\psi(x) = \frac{q(L-x)^4}{24} - \frac{F_1^{\text{гор}}(H_1-x)^2}{6} + \frac{F_2^{\text{гор}}(H_2-x)^3}{6}; \quad (6)$$

$$\Phi(x) = \frac{q(L-x)^3}{6} - \frac{F_1^{\text{гор}}(H_1-x)^2}{2} + \frac{F_2^{\text{гор}}(H_2-x)^2}{2} \quad (7)$$

для сечений, расположенных ниже уровня прикрепления нижних растяжек.

Для сечений трубы, расположенных между верхними и нижними растяжками, в выражениях (6)

и (7) остаются два первых члена; для сечений, расположенных выше уровня прикрепления верхних растяжек, — только первый член.

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяются из условий отсутствия перемещений и углов поворота на уровне верха переходной царги. Для вышележащих царг постоянные  $C_i$  и  $C_{i+1}$  устанавливаются из условий равенства перемещений и углов поворота в местах сопряжения царг. Возможность нарушения жесткости фланцевых соединений является отдельным вопросом и в данной работе не рассматривается. Указанные условия приводят к соотношениям:

$$C_3 = (EI_2 - EI_1)\varphi_1 + C_1; \quad (8)$$
$$C_5 = (EI_3 - EI_2)\varphi_2 + C_3;$$

$$C_7 = (EI_4 - EI_3)\varphi_3 + C_5; \quad \dots \dots \dots$$

$$C_4 = (EI_2 - EI_1)(y_1 - h_1\varphi_1) + C_2; \quad (9)$$
$$C_6 = (EI_3 - EI_2)(y_2 - h_2\varphi_2) + C_4;$$
$$C_8 = (EI_4 - EI_3)(y_3 - h_3\varphi_3) + C_6; \quad \dots \dots \dots$$

и т.д.

Усилия в растяжках определялись из условия равенства прогибов трубы и горизонтальных проекций удлинений растяжек в уровнях прикрепления растяжек от совместного действия ветровой нагрузки и этих усилий (рис. 3).

Удлинение растяжки после простых преобразований можно выразить следующим образом:

$$\Delta = L_{\text{деф}} - L_0 = \left( L_0^2 + y^2 + 2by \right)^{\frac{1}{2}} - L_0, \quad (10)$$

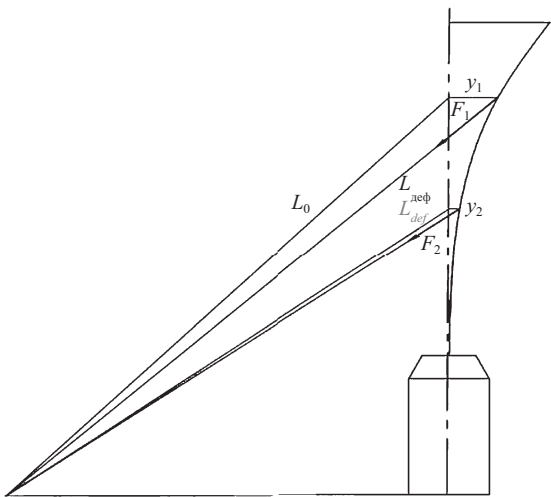


Рис. 3. Деформированная схема системы «ствол трубы – растяжка»

Fig. 3. Deformed diagram of the “pipe trunk – extension” system

а учитывая, что  $y^2 \ll 2by$  и  $\Delta \ll 2L_0$ , без сколько-нибудь существенной погрешности  $\Delta$  можно определить как:

$$\Delta = \frac{b_i}{L_0^2}. \quad (11)$$

Относительная деформация растяжек составит:

$$\varepsilon(H_i) = \frac{by(H_i)}{L_0^2}, \quad (12)$$

а продольные усилия в растяжках:

$$F_i = \frac{E_{\text{раст}} A_{\text{раст}} by(H_i)}{L_0^2}, \quad (13)$$

где  $E_{\text{раст}}$  и  $A_{\text{раст}}$  — модуль упругости и площадь поперечного сечения растяжки соответственно;  $y(H_i)$  — прогибы в уровнях прикрепления растяжек, определяемые по формулам (4) и (6). Проекция усилий в растяжках на горизонталь составят:

$$F_i^{\text{гор}} = \frac{E_{\text{раст}} A_{\text{раст}} b^2 y(H_i)}{L_0^3}, \quad (14)$$

а проекции удлинений растяжек на горизонталь:

$$y(H_i) = F_i^{\text{гор}} (E_{\text{раст}} A_{\text{раст}}) \left( \frac{L_0^3}{b^2} \right). \quad (15)$$

Определение усилий в растяжках, поскольку в рассматриваемой задаче верхние растяжки прикреплены к пятой царге, а нижние — к третьей, сводится к решению системы двух уравнений:

$$\psi(H_1) + C_9 H_1 + C_{10} = F_1^{\text{гор}} \left( \frac{EI_5}{E_{\text{раст}} A_{\text{раст}}} \right) \left( \frac{L_{0\text{верх}}^3}{b^2} \right); \quad (16)$$

$$\psi(H_2) + C_5 H_2 + C_6 = F_2^{\text{гор}} \left( \frac{EI_3}{E_{\text{раст}} A_{\text{раст}}} \right) \left( \frac{L_{0\text{верх}}^3}{b^2} \right).$$

По указанным выше формулам для реально существующей трубы был проведен ряд расчетов: с толщинами, замеренными в 15 точках, по минимальным и средним арифметическим значениям; с проектными толщинами, а также для гипотетических труб с толщинами 1,0; 1,9 и 2,7 мм. Расчеты не приводятся из-за большого объема простых вычислений. Определены прогибы и углы поворота, изгибающие моменты, продольные силы, напряжения  $\sigma_m = MR/I$  и  $\sigma_n = N/F$ . При этом оказалось, что величина  $\sigma_m/(\sigma_m + \sigma_n)$ , входящая в формулу (2), обладает незначительной вариативностью для царг, расположенных ближе к основанию трубы, где значения напряжений  $\sigma_m$  и  $\sigma_n$  больше и соответственно возможность местной потери устойчивости выше. Так, для верхней царги, вероятность потери которой пренебрежимо мала, этот параметр варьировался

в пределах 14 %, для следующей — в пределах 4 %, а для нижележащих, напряжения в которых уже достаточно велики, не превышал 2 %. В нижней царге, воспринимающей максимальные изгибающий момент и поперечную силу, для проектного сечения толщиной 7 мм отношение  $\sigma_m/(\sigma_m + \sigma_n)$  составило 0,888, для сечения, ослабленного до 6,5 мм и далее до гипотетического сечения толщиной 1 мм, это отношение составляло 0,850–0,902.

Так как в исследуемой трубе вторая царга, согласно данным обследования, оказалась значительно более ослабленной, чем первая (до минимальной измеренной толщины 2,7 мм), возможность местной потери устойчивости устанавливалась для этой царги. Отношение  $\sigma_m/(\sigma_m + \sigma_n)$  для нее составило 0,852.

Однако, производя расчет по формуле (2) в запас прочности, следует принять отношение  $\sigma_m/(\sigma_m + \sigma_n)$  равным 0,902, потому что, согласно исследованиям Э.Л. Аксельрада,  $(p_* - p_{0*})$  является отрицательной величиной.

Величина  $p_*$  определяется в зависимости от длины трубы, ее кривизны и начальных неправильностей по графикам, приведенным в указанной монографии.

Чтобы оценить возможное влияние начальных неправильностей, учтем (также возможную) переменность толщины стенки трубы от минимальной (2,7 мм) до изначальной (7 мм).

В этих условиях можно принять  $\chi = 0,68$  (по графику рис. 40, с. 230 [21]).

Величина  $\chi_0$  учитывает влияние осевого сжатия и осесимметричных неправильностей ее формы на критическое напряжение. В условиях отсутствия достоверных данных об этих неправильностях Э.Л. Аксельрад рекомендует принимать  $\chi_0 = 0,5$ :

$$p_{0*} = \frac{0,5}{(3(1 - 0,3^2))^{1/2}} = 0,5 \cdot 0,605 = 0,302.$$

Наибольшее отклонение оси трубы от прямолинейности  $h$ , допускаемое по ГОСТ, составляет 1,5 мм на 1 м длины. Считая, что по длине второй царги (7,07 м) кривизна оси постоянна, допускаемое отклонение получим  $h = 7,07 \cdot 1,5 = 10,605$  мм. Радиус кривизны на рассматриваемом участке трубы будет равен:

$$R_m = \frac{L^2}{8h} = \frac{707^2}{8 \cdot 10,605} = 58\,916, (6) \text{ см.}$$

Соответствующее значение параметра кривизны  $\mu$  составит:

$$\begin{aligned} \mu &= \left( 12 \cdot (1 - \nu^2) \right)^{1/2} \cdot \frac{R^2}{(R_m \delta)} = \\ &= \left( 12 \cdot (1 - 0,3^2) \right)^{1/2} \cdot \frac{125^2}{(58\,916, (6) \cdot 0,27)} = 3,2458. \end{aligned}$$

Значение параметра  $l_2$ , являющегося основной характеристикой длины трубы, определяется по формуле:

$$l_2 = 0,67(1 + 0,0033\mu^2) \cdot \frac{H}{R} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{1/2}, \quad (17)$$

где  $H$  — принятая для расчета длина цилиндрической оболочки, равная 39,61 м.

Как указывалось выше, в качестве расчетного принималось сечение толщиной 2,7 мм. При этом нет уверенности в том, что по всей внутренней поверхности второй цаги ослабление поперечного сечения составляет 4,3 мм.

Игнорирование этого обстоятельства при расчете критического напряжения по применяемой методике может привести к его неоправданному завышению. Поэтому определим диапазон значений параметра  $l_2$  по толщине 2,7 мм, которую считаем минимальной, и по изначальной толщине 7 мм:

$$\begin{aligned} l_2(0,27) &= 0,67(1 + 0,0033 \cdot 3,2458^2) \times \\ &\times (39,61/1,25)(0,027/125)^{1/2} = 1,02; \\ l_2(0,7) &= 0,67(1 + 0,0033 \cdot 3,2458^2) \times \\ &\times (39,61/1,25)(0,07/125)^{1/2} = 1,66. \end{aligned}$$

Этим величинам параметров  $\mu$ ,  $l_2$  и  $\chi$  по графику, приведенному в указанной монографии, соответствует значение  $p_* = 0,15$ .

Левая часть формулы (2) для фактического соотношения  $\delta/R = 0,0027/1,25$  может быть приведена к более удобному виду. При этом соотношении разница между значениями момента инерции  $I$ , определенными по формуле:

$$I = (\pi/4)(R^4 - (R - \delta)^4) \text{ и } I = \pi R^3 \delta,$$

составляет 0,32 %, разница между площадями поперечных сечений, определенными по формуле:

$$F = \pi(R^2 - (R - \delta)^2) \text{ и } F = 2\pi R \delta,$$

составляет 0,108 %.

Таким образом, без существенных потерь в точности решения можно считать, что:

$$M \cdot \frac{R}{I} + \frac{N_*}{F} = \frac{M}{\pi R^2 \delta} + \frac{N_*}{2\pi R \delta}. \quad (18)$$

Тогда формулу (2) можно преобразовать к виду:

$$M_* \pi R^2 \delta + \frac{N_*}{2\pi R \delta} = \left(E \frac{\delta}{R}\right) \left(p_0 + \frac{p^* - p_0^*}{\sigma t + \sigma n}\right)^{1/2}, \quad (19)$$

откуда в первом приближении толщина стенки наиболее дефектной цаги определяется как:

$$\delta = \frac{M_*/R + N_*/2}{E_\pi \left(p_{0*} + \frac{(p^* - p_0^*)\sigma t}{\sigma t + \sigma n}\right)^{1/2}}. \quad (20)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Толщину, определяемую в соответствии с изложенной методикой, можно назвать условно критической, так как при ее установлении толщина наиболее ослабленной цаги принята равной фактической. После определения толщины по формуле (20) следует провести проверочный расчет и вновь сопоставить величины левой и правой частей формулы (2). Такой расчет был проделан, и результат показал совпадение расчета в первом приближении и проверочного с разницей 0,79 %, которую в рамках поставленной задачи можно считать приемлемой. Выявление такой условно критической толщины при плановом обследовании трубы, установленной соответствующими нормативными документами, не означает необходимости вывода трубы из эксплуатации или ее усиления. В этом случае необходимо по определенным в ходе обследования толщинам стенок провести расчет по описанной методике, вычислить реальные величины изгибающего момента продольной силы в опасных сечениях и проверить устойчивость трубы по формуле (2).

Границей применимости данного подхода является фактическое значение перемещения в уровне прикрепления растяжек, равное:

$$y(H_i) = \frac{\sigma_T L_0^2}{E_{\text{раст}} b}, \quad (21)$$

при котором напряжения в растяжке достигают предела текучести.

Для исследуемой дымовой трубы, например, мониторинг, проведенный в соответствии с нормативным документом<sup>10</sup>, выявил не только ослабления поперечных сечений трубы, но и направление ее крена и отдельные замеренные перемещения. Труба имеет наклон в сторону растяжки I, а замеренные прогибы ее в уровне растяжек значительно превышают значения, определяемые формулой (21). Данное обстоятельство объясняется причинами, описанными в работе [19].

Исследование НДС системы «ствол трубы — растяжки» в условиях, когда часть системы находится в области упругих деформаций, а другая часть — в состоянии текучести, может быть продолжением настоящей работы.

<sup>10</sup> СП 89.13330.2016. Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76 : утв. Приказом Минстроя России от 16.12.2016 № 944/пр (ред. от 15.12.2021).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Губанов В.В. Обеспечение заданной долговечности металлических промышленных высотных сооружений : дис. ... д-ра техн. наук. Макеевка, 2013. 363 с.
2. Holmes J.D. Fatigue life under along-wind loading — closed-form solutions // *Engineering Structures*. 2002. Vol. 24. Issue 1. Pp. 109–114. DOI: 10.1016/s0141-0296(01)00073-6
3. Саченков А.В. Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек // *Исследования по теории пластин и оболочек*. 1970. № 6–7. С. 391–433.
4. Сатъянов В.Г., Пилипенко П.Б., Французов В.Д., Сатъянов С.В., Котельников В.С. Способ определения остаточного ресурса промышленных дымовых и вентиляционных труб // *Безопасность труда в промышленности*. 2007. № 12. С. 34–38. EDN JTLOBP.
5. Сатъянов В.Г. и др. Методика расчета нагрузок, прочности и ресурса стволов дымовых и вентиляционных промышленных труб. М. : Универсум, 2005. EDN QNKXIJ.
6. Губанов В.В., Оленич Е.Н., Оленич А.В. Влияние конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2019. № 4 (138). С. 57–63. EDN JXWGWGP.
7. Губанов В.В., Голиков А.В. Качественные характеристики взаимодействия дымовых труб на оттяжках с анкерными фундаментами // *Металлические конструкции*. 2016. Т. 22. № 3. С. 115–124. EDN WXDIIJT.
8. Губанов В.В., Оленич Е.Н. Особенности износа стальных дымовых труб на оттяжках // *Металлические конструкции*. 2022. Т. 28. № 4. С. 167–181. EDN KLFNUF.
9. Губайдулин М.Р., Губайдулин Р.Г., Шматков А.С. Анализ методов оценки остаточного ресурса дымовых и вентиляционных промышленных труб // *Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр.* 2009. № 8. С. 314–319.
10. Яровой С.Н., Фурсов В.В. Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения дефектов и повреждений // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. № 83. С. 243–248.
11. Stangenberg F., Breitenbücher R., Bruhns O.T., Hartmann D., Höffer R., Kuhl D. et al. Lifetime-oriented design concepts // *Lifetime-Oriented Structural Design Concepts*. 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01462-8\_1
12. Simonović A.M., Stupar S.N., Peković O.M. Stress Distribution as a Cause of Industrial Steel Chimney Root Section Failure // *FME Transactions*. 2008. No. 36. Pp. 119–125.
13. Kanerkar S. Effect of Geometric Parameter on Steel Chimney // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2020. Vol. 8. Issue 6. Pp. 1775–1780. DOI: 10.22214/ijra-set.2020.6291
14. Maheswari A.U., Peera S.K. Design of Guy Supported Industrial Steel Chimneys // *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1217–1225. DOI: 10.35940/ijrte.a1473.059120
15. Deore S.S., Ankushrao N.P., Mate. N.U. Parametric study of industrial chimneys // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. Vol. 9. Issue 5.
16. Ельшин А.М., Ижорин М.Н., Жолудов В.С., Овчаренко Е.Г. Дымовые трубы. М. : Стройиздат, 2001.
17. Суслонов А.А. Разработка методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации дымовых металлических труб с учетом температурно-силовых и коррозионных воздействий рабочих сред : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 158 с. EDN NMYIOD.
18. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. М. : Наука, 1978.
19. Оленич Е.Н. Несущая способность дымовых труб на оттяжках с учетом технического обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. 2023. 177 с. EDN GPTMHF.
20. Almroth B.O., Holmes A.M., Brush D.O. An experimental study of the buckling of cylinders under axial compression // *Experimental Mechanics*. 1964. Vol. 4. Issue 9. Pp. 263–270. DOI: 10.1007/bf02323088
21. Аксельрад Э.П. Гибкие оболочки. М. : Наука, 1976. 376 с.

Поступила в редакцию 12 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 10 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Юрий Борисович Филатов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной и теоретической механики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-8191-8176; yuryfil50@yandex.ru;



**Оксана Юрьевна Сапожникова** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; oksanalitovch@gmail.com.

*Вклад авторов:*

Филатов Ю.Б. — постановка задачи, анализ литературы, методика выполнения расчетов, частичное их выполнение.

Сапожникова О.Ю. — частичное выполнение расчетов, выполнение рисунков, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Gubanov V.V. *Ensuring the specified durability of metal industrial high-rise structures : dis. ... doctor of technical sciences*. Makeyevka, 2013; 363. (rus.).
2. Holmes J.D. Fatigue life under along-wind loading — closed-form solutions. *Engineering Structures*. 2002; 24(1):109-114. DOI: 10.1016/s0141-0296(01)00073-6
3. Sachenkov A.V. Theoretical and experimental method for studying the stability of plates and shells. *Research in the Theory of Plates and Shells*. 1970; 6-7:391-433. (rus.).
4. Satyanov V.G., Pilipenko P.B., Frantsuzov V.D., Satyanov S.V., Kotelnikov V.S. Method for determining the residual life of industrial smoke and ventilation stacks. *Occupational Safety in Industry*. 2007; 12:34-38. EDN JTLOBP. (rus.).
5. Satyanov V.G. et al. *Methodology for calculating loads, strength and service life of flue and ventilation industrial pipe trunks*. Moscow, Universum, 2005. EDN QNKXIJ. (rus.).
6. Gubanov V., Olenich E., Olenich A. Influence of constructive parameters on the stress-strain state of the chimney with two levels of delays. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019; 4(138):57-63. EDN JXWGWP. (rus.).
7. Gubanov V., Golikov A. Qualitative parameters of guyed chimney interaction with anchor foundations. *Metall Constructions*. 2016; 22(3):115-124. EDN WXDIJT. (rus.).
8. Gubanov V., Olenich E. Wear peculiarity of steel chimneys with guys. *Metall Constructions*. 2022; 28(4):167-181. EDN KLFNUF. (rus.).
9. Gubaidulin R.G., Gubaidulin M.R., Shmatkov A.S. Analysis of methods for estimating the residual life of industrial flue and ventilation pipes. *Prevention of accidents in buildings and structures : collection of scientific papers*. 2009; 8:314-319. (rus.).
10. Yarovoy S.N., Fursov V.V. Damage to metal chimneys and load-bearing towers throughout the life cycle and the limits of defects and damages. *Construction, materials science, mechanical engineering*. 2016; 83:243-248. (rus.).
11. Stangenberg F., Breitenbücher R., Bruhns O.T., Hartmann D., Höffer R., Kuhl D. et al. Lifetime-oriented design concepts. *Lifetime-Oriented Structural Design Concepts*. 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01462-8\_1
12. Simonović A.M., Stupar S.N., Peković O.M. Stress Distribution as a Cause of Industrial Steel Chimney Root Section Failure. *FME Transactions*. 2008; 36:119-125.
13. Kanerkar S. Effect of Geometric Parameter on Steel Chimney. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2020; 8(6):1775-1780. DOI: 10.22214/ijraset.2020.6291
14. Maheswari A.U., Peera S.K. Design of Guy Supported Industrial Steel Chimneys. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020; 9(1):1217-1225. DOI: 10.35940/ijrte.a1473.059120
15. Deore S.S., Ankushrao N.P., Mate. N.U. Parametric study of industrial chimneys. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022; 9(5).
16. Yelshin A.M., Izhorin M.N., Zholudov V.S., Ovcharenko E.G. *Smokestacks*. Moscow, Stroyizdat, 2001. (rus.).
17. Suslonov A.A. *Development of methods for assessing and predicting the resource of safe operation of metal flue pipes, taking into account the temperature, force and corrosive effects of working environments : dissertation ... Candidate of Technical Sciences*. Ufa, 2004; 158. EDN NMYIOD. (rus.).
18. Grigolyuk E.I., Kabanov V.V. *Stability of shells*. Moscow, Nauka, 1978. (rus.).
19. Olenich E.N. *Bearing capacity of chimneys on guy wires taking into account maintenance : dis. ... candidate of technical sciences*. 2023; 177. EDN GPTMHF. (rus.).
20. Almroth B.O., Holmes A.M., Brush D.O. An experimental study of the bucking of cylinders under axial compression. *Experimental Mechanics*. 1964; 4(9):263-270. DOI: 10.1007/bf02323088
21. Akselrad E.P. *Flexible shells*. Moscow, Nauka, 1976; 376. (rus.).

Received May 12, 2025.

Adopted in revised form on May 24, 2025.

Approved for publication on June 10, 2025.

**B I O N O T E S:** **Yury B. Filatov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8191-8176; yuryfil50@yandex.ru;

**Oksana Yu. Sapozhnikova** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; oksanalitovch@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Yury B. Filatov — problem statement, literature analysis, calculation methodology, partial implementation.*

*Oksana Yu. Sapozhnikova — partial execution of calculations, execution of drawings, design of the article.*

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.011:539

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198

## Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига

Дмитрий Николаевич Лазовский<sup>1</sup>, Артур Иванович Гиль<sup>1</sup>,  
Дмитрий Олегович Глухов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой); г. Новополоцк, Республика Беларусь;  
<sup>2</sup> СофтКлуб; г. Минск, Республика Беларусь

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальными задачами проектирования строительных конструкций из древесины являются расчет и конструирование изгибаемых элементов с учетом сдвига (скалывания). Рассмотрен вариант применения деформационного подхода для расчета прочности деревянных элементов при поперечном изгибе с учетом сдвига, основанный на использовании диаграмм деформирования древесины при сжатии и растяжении с учетом нелинейной работы.

**Материалы и методы.** Верификация предложенного подхода расчета прочности проводилась на данных собственных экспериментальных исследований деревянных элементов при поперечном изгибе. Критерием разрушения элемента принято максимальное значение внутреннего усилия, при котором выполняются условия равновесия системы разрешающих уравнений, либо несоблюдение условий прочности при сдвиге в поперечных сечениях по длине площадки сдвига конструкции, в том числе с учетом нелинейной работы древесины при сжатии.

**Результаты.** Предложенный деформационный подход позволяет получить распределение сдвигающих усилий на участке возможного сдвига вдоль волокон балки на любой стадии нагружения. Анализ результатов экспериментально-теоретических исследований свидетельствует о возможности применения предложенного подхода для проверки прочности деревянных конструкций при изгибе с учетом сдвига. Экспериментально установлены схемы разрушения древесины при сдвиге, которые заключаются в сдвиге волокон не по плоскости в нейтральной зоне, а по годичным кольцам древесины. Предложенный критерий разрушения позволяет учитывать возможный сдвиг древесины при поперечном изгибе.

**Выводы.** На основе исследований сделан вывод, что особое внимание при расчете изгибаемых деревянных элементов с учетом сдвига следует уделять реальной прочности древесины на сдвиг, которая в реальных конструкциях зависит от площадки сдвига с учетом расположения годичных колец в поперечном сечении конструкции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** деревянные конструкции, нелинейная деформационная модель, изгиб, сдвиг, прочность, растяжение, сжатие

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198

Автор, ответственный за переписку: Артур Иванович Гиль, a.hil@psu.by.

## Deformation approach to the calculation of shear strength in transverse bending of wooden elements

Dzmitry N. Lazouski<sup>1</sup>, Artur I. Hil<sup>1</sup>, Dzmitry O. Hlukhau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU); Novopolotsk, Republic of Belarus;  
<sup>2</sup> SoftClub; Minsk, Republic of Belarus

### ABSTRACT

**Introduction.** The calculation and design of bending elements taking into account shear (spalling) are urgent tasks in the design of building structures made of wood. The variant of application of the deformation approach to calculate the strength of wooden elements in transverse bending taking into account shear, based on the use of wood deformation diagrams in compression and tension taking into account nonlinear work, is considered.

**Materials and methods.** The verification of the proposed strength calculation approach was carried out on the basis of our own experimental studies of wooden elements during transverse bending. The criterion for the destruction of an element is the maximum value of the internal force at which the equilibrium conditions of the system of resolving equations are fulfilled, or non-compliance with shear strength conditions in cross-sections along the length of the shear site of the structure, including taking into account the nonlinear work of wood during compression.

**Results.** The proposed deformation approach makes it possible to obtain the distribution of shear forces in the area of possible shear of the beam fibres at any stage of loading. An analysis of the results of experimental and theoretical studies indicates the possibility of using the proposed approach to test the strength of wooden structures when bending, taking into account shear. Schemes of wood destruction during shear were experimentally established, which consist in shifting the fibres not along the plane in the neutral zone, but along the annual rings of wood. The proposed destruction criterion makes it possible to take into account the possible displacement of wood during transverse bending.

**Conclusions.** Based on the research, it was concluded that special attention should be paid to the actual shear strength of wood when calculating bent wooden elements, taking into account shear, which in real structures depends on the shear site, taking into account the location of the growth rings in the cross-section of the structure.

**KEYWORDS:** wooden structures, nonlinear deformation model, bending, shear, strength, stretching, compression

**FOR CITATION:** Lazouski D.N., Hil A.I., Hlukhau D.O. Deformation approach to the calculation of shear strength in transverse bending of wooden elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1187-1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198 (rus.).

Corresponding author: Artur I. Hil, a.hil@psu.by.

## ВВЕДЕНИЕ

Древесина — природное строительное сырье, которое за счет своих высоких показателей прочности при изгибе, сжатии и растяжении вдоль волокон применяется в качестве конструкционного материала при строительстве жилых и общественных зданий. Древесина экологически чистое вещество, стойкое ко многим видам агрессивных сред, легко обрабатываемое. С разработкой синтетических клеев, обеспечивающих равнопрочное соединение при сдвиге, появилась возможность увеличения поперечного сечения деревянных конструкций с оптимальным распределением прочности древесины по сечению и создания нового вида деревянных конструкций — клеодеревянные. Современные технологии позволяют производить высокоэффективные клееные конструкции (панели) из перекрестных досок (CLT). Однако наряду с преимуществами древесины обладает рядом недостатков, в первую очередь, из-за своей ярко выраженной анизотропной структуры — относительно низкая прочность при сжатии и растяжении поперек волокон, при сдвиге (скалывании), особенно по поверхности годовичных колец. Кроме того, древесина имеет природные дефекты (в первую очередь, различного рода сучки), которые могут существенно влиять на прочность конструкции при различных силовых воздействиях.

При расчете деревянных изгибаемых конструкций, как правило, их сопротивление определяется максимальным изгибающим моментом и зависит от геометрии сечения и прочности древесины при изгибе. Как показывает строительная практика, зачастую деревянные изгибаемые конструкции могут разрушаться не только при исчерпании несущей способности в сжатой или растянутой зоне, но и от сдвига продольных волокон относительно друг друга [1]. Такой вид разрушения встречается не только в конструкциях из цельной, но и из клееной древесины.

Скалывание, как и растяжение поперек волокон, является наиболее слабым видом сопротивления древесины. Характер разрушения хрупкий. Пороки резко снижают сопротивление древесины

скалыванию. Различают: скалывание вдоль волокон; скалывание поперек волокон; скалывание под углом к волокнам. В деревянных конструкциях древесина чаще всего работает на скалывание вдоль волокон.

Таким образом, расчет и конструирование изгибаемых элементов с учетом сдвига (скалывания) — актуальные задачи проектирования строительных конструкций из древесины.

В общем случае работы изгибаемых конструкций при воздействии поперечной нагрузки, кроме нормальных напряжений растяжения — сжатия вдоль волокон древесины в пролете конструкции, появляются касательные напряжения, проявляющиеся в деревянных конструкциях в виде сдвига (скалывания) вдоль волокон у опор [2]. Ввиду волокнистого строения древесины ее прочность при сдвиге вдоль волокон значительно меньше, чем при растяжении — сжатии. Скалывающие касательные напряжения распределяются неравномерно по высоте поперечного сечения. Наибольшие их значения в поперечном сечении изгибаемого элемента — на уровне нейтральной оси. Из-за нелинейной работы древесины при сжатии положение нейтральной оси по длине зоны действия скалывающих касательных напряжений изменяется, в отличие от упругого подхода к расчету деревянных конструкций.

Прочность цельной древесины на сдвиг устанавливается на небольших образцах из древесины без дефектов [3, 4]. В настоящее время действуют нормативные документы для определения прочности при сдвиге для цельной<sup>1</sup> и клееной<sup>2</sup> древесины. Испытания проводят как в заранее заданной конструкцией образца тангенциальной плоскости сдвига, так и в радиальной<sup>1, 2</sup>. Напряжения сдвига возникают в конструкции также при внецентренном сжатии и внецентренном растяжении [4]. Значения характеристической прочности древесины при сдвиге регламентируются нормативными доку-

<sup>1</sup> ГОСТ 16483.5–73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон.

<sup>2</sup> ГОСТ 20182–74. Конструкции асбестоцементные клееные. Метод определения прочности клеевых соединений при сдвиге.



ментами<sup>3, 4, 5, 6, 7</sup>. Лиственные породы лучше сопротивляются сдвигу, чем хвойные [5]. Известны методики оценки минимальной прочности древесины при сдвиге (скалывании) по поверхности годичных колец<sup>8</sup> при исследовании соединений, работающих на скалывание [6]. Имеются исследования прямого определения прочности древесины при сдвиге в результате испытания изгибаемых деревянных элементов<sup>9, 10</sup>. При этом следует заметить, что прочность древесины на скалывание зависит от расположения волокон, при сдвиге в радиальном направлении волокон прочность выше, чем при тангенциальном. Также отмечено, что с увеличением площади сдвига происходит снижение прочности на сдвиг [7].

Важность учета возможности сдвига подчеркивает тот факт, что при эксплуатации основным из самых распространенных дефектов деревянных элементов является растрескивание вдоль волокон — около 75 % [8]. При действии равномерно распределенной нагрузки деформации сдвига распространялись из пролета к опорам. Кроме того, технологические (отверстия, изменения размеров поперечного сечения на участке действия сдвигающих усилий) и природные (сучки) дефекты приводят к концентрациям напряжений сдвига [8].

Особенности разрушения при сдвиге: разрушение характеризуется скольжением волокон относительно себя, растрескиванием параллельно волокнам и считается хрупким. Продольные трещины не всегда проявляются на поверхности конструкции, в большинстве случаев являются закрытыми, их трудно идентифицировать внешне, если только они не проявляются на торце элемента [8]. Прочность древесины при сдвиге (скалывании) зависит

также от температуры окружающего воздуха, при ее повышении прочность на сдвиг уменьшается [9].

Действие сдвигающих касательных напряжений сказывается на деформативности изгибаемых деревянных конструкций при больших соотношениях вертикального размера поперечного сечения и пролета [10]. Изучение на цельнодеревянных балках ограниченного природой поперечного сечения показывает, что при оценке их прогибов влиянием деформаций сдвига можно пренебречь [2].

В исследованиях [11–13] при поперечном изгибе клееной однонаправленной древесины балки разрушались от скалывания вдоль волокон по древесине или по клеевому шву. Развитие скалывания начиналось в пролете и распространялось к опорам.

При поперечном изгибе в общем случае нагружения в поперечном сечении деревянного элемента, кроме изгибающего момента, действует и поперечная сила и, как следствие, связанные с ней касательные напряжения в направлении ее действия. По закону парности касательных напряжений аналогичные по величине касательные напряжения возникают и в направлении вдоль оси элемента (вдоль волокон древесины). Именно на эти касательные напряжения вдоль оси деревянного элемента и выполняется проверка прочности на сдвиг вдоль волокон древесины, которая плохо сопротивляется в этом направлении.

Проверка на сдвиг вдоль волокон деревянных изгибаемых элементов по действующим нормативным документам<sup>5, 6, 7</sup> проводится из условия:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}^p \quad (1)$$

где  $V_{Ed}$  — расчетное значение поперечного усилия от внешних воздействий;  $V_{Rd}$  — расчетное усилие сопротивления деревянного элемента,

$$V_{Rd} = \frac{J_{br} b_{ef} f_{v,d}}{S_{br}}, \quad (2)$$

где  $J_{br}$  — момент инерции брутто относительно нейтральной оси;  $b_{ef}$  — расчетное значение ширины элемента;  $f_{v,d}$  — расчетное значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон;  $S_{br}$  — статический момент брутто сдвигаемой части относительно нейтральной оси.

Проверка на сдвиг для поперечного изгиба деревянных элементов из условия (1) производится по формуле Д.И. Журавского в предположении упругой работы древесины [7].

Цель данной работы — адаптация нелинейного деформационного подхода для расчета прочности изгибаемых деревянных элементов с учетом возможного сдвига древесины вдоль волокон и его влияния на прочность конструкции в целом.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нелинейная деформационная модель для расчета параметров напряженно-деформированного состо-

<sup>3</sup> BS EN 16351:2015. Timber structures — Cross laminated timber — Requirements. BSI Standards Publication, London.

<sup>4</sup> AFPA 1991b. ANSI/NFPA NDS Supplement – 1991. National design specification for wood construction. Washington, DS : American Forest and Paper Association.

<sup>5</sup> Eurocode 5. Design of timber structures — Part 1–1: General — Common rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2004. 121 p.

<sup>6</sup> СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80. М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. 97 с.

<sup>7</sup> СП 5.05.01–2021. Деревянные конструкции. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. 111 с.

<sup>8</sup> Патент RU № 2675489. Способ скалывания древесины вдоль волокон / В.Г. Уласовец. Оpubл. 19.12.2018. Бюл. № 35.

<sup>9</sup> ASTM D5379/D5379M. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. USA : ASTM International, 2005.

<sup>10</sup> ASTM D2718–00. Standard test methods for structural panels in planar shear (RS). USA : ASTM International, 2006.

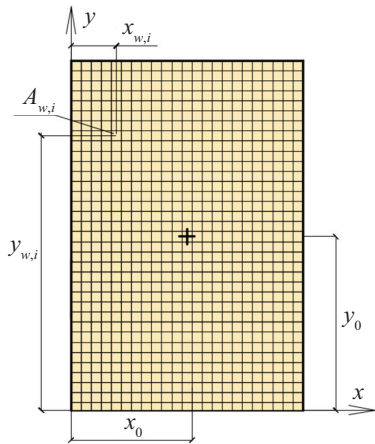


Рис. 1. Расчетное поперечное сечение деревянного элемента

Fig. 1. Calculated cross-section of a wooden element

яния (НДС) строительных конструкций с развитием информационных технологий применяется для железобетонных, каменных, сталежелезобетонных, и в том числе деревянных конструкций [1, 14–20]. Расчет производится на основе диаграмм деформирования материалов строительных конструкций при сжатии – растяжении. Диаграммный подход позволяет вычислять параметры НДС деревянных конструкции при любых видах НДС, на любой стадии работы под нагрузкой. При этом конструкция может быть любой формы поперечного сечения, включая многослойную с различными физико-механическими характеристиками материалов слоев.

Поперечное сечение деревянного элемента представляется совокупностью элементарных площадок с равномерно распределенными нормальными напряжениями сжатия – растяжения, величина которых зависит от относительных деформаций в центре тяжести элементарной площадки согласно принятым диаграммам деформирования древесины (рис. 1). Распределение относительных деформаций по поперечному сечению деревянного элемента подчиняется гипотезе Бернулли о плоском сечении.

Система разрешающих уравнений для деревянного элемента в общем случае косоуго изгиба при воздействии изгибающих моментов  $M_x$  и  $M_y$  в плоскости центральных осей  $x$  и  $y$  имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (x_0 - x_{w,i}) - M_x = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (y_0 - y_{w,i}) - M_y = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} - N = 0; \\ \varepsilon_{w,i} = (1/r)_x (x_0 - x_{w,i}); \quad \varepsilon_{w,i} = (1/r)_y (y_0 - y_{w,i}); \\ \sigma_{w,i} = f(\varepsilon_{w,i}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sigma_{w,i}$  и  $\varepsilon_{w,i}$  — соответственно нормальные напряжения и относительные деформации в  $i$ -й элементарной площадке деревянного элемента;  $A_{w,i}$  и  $y_{w,i}$  — соответственно площадь поперечного сечения и расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $i$ -й элементарной площадки;  $x_0$  и  $y_0$  — расстояние от выбранной оси до центра тяжести поперечного сечения;  $(1/r)_x$  и  $(1/r)_y$  — кривизна изгибаемого элемента в рассматриваемом поперечном сечении в плоскости осей соответственно  $x$  и  $y$ .

Диаграмма деформирования древесины с модулем упругости при сжатии вдоль волокон  $E_w$  аппроксимируется параболической зависимостью [1]:

$$\frac{\sigma_w}{f_{c,0,m}} = - \left( \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right) \text{ для } \varepsilon_w \leq 0, \quad (4)$$

где  $f_{c,0,m}$  — среднее значение сопротивления древесины вдоль волокон при сжатии;  $k = E_w / E_{c,0,1}$ ;  $E_{c,0,1} = \sigma_{c,0,1} / \varepsilon_{c,0,1}$  — модуль деформаций в верхней точке диаграммы деформирования;  $\eta = \varepsilon_w / \varepsilon_{c,0,1}$ ;  $\varepsilon_{c,0,1}$  — относительные деформации древесины вдоль волокон в точке максимального сжимающего напряжения.

Диаграмма деформирования древесины при сжатии не ограничивается предельными значениями относительных деформаций.

Диаграмма деформирования древесины при растяжении аппроксимируется линейной зависимостью [1]:

$$\sigma_w = \varepsilon_w \cdot E_{t,0} \text{ для } 0 < \varepsilon_w \leq \varepsilon_{t,0,u}, \quad (5)$$

где  $E_{t,0}$  — модуль упругости древесины при растяжении вдоль волокон;  $\varepsilon_{t,0,u}$  — относительные деформации предельной растяжимости древесины.

Общий вид диаграмм деформирования древесины при растяжении и сжатии представлен на рис. 2.

Для учета возможного сдвига волокон древесины в зоне нейтральной оси необходимо рассмотреть опасные поперечные сечения балки по длине пролета

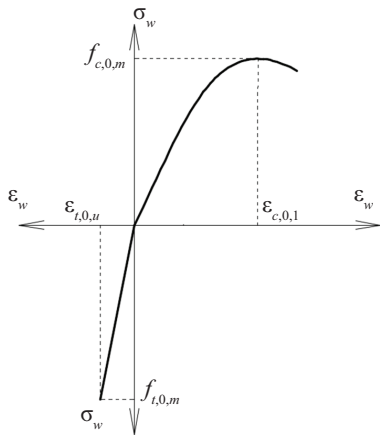


Рис. 2. Диаграмма деформирования древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон

Fig. 2. Diagram of wood deformation during stretching and compression along the fibres

в зоне действия поперечных сил. В данных поперечных сечениях по деформационной модели на любой стадии работы под нагрузкой получают эпюры распределения нормальных напряжений при сжатии и растяжении в любых точках конструкции по длине.

Затем по полученным эпюрам нормальных напряжений вычисляются сдвигающие усилия в рассматриваемом поперечном сечении  $T_E$ , Н:

$$T_E = \Sigma \sigma_{w,i} \cdot h_{w,i} \cdot b, \quad (6)$$

где  $\sigma_{w,i}$  — нормальные напряжения сжатия в середине  $i$ -й элементарной площадки рассматриваемого поперечного сечения элемента;  $h_{w,i}$  — линейный размер  $i$ -й элементарной площадки по высоте поперечного сечения;  $b$  — ширина элемента в рассматриваемом поперечном сечении.

Проверка прочности на сдвиг в рассматриваемом поперечном сечении изгибаемого деревянного элемента производится из условия:

$$T_E \leq T_R, \quad (7)$$

где  $T_R$  — сдвигающее усилие сопротивления, воспринимаемое древесиной в рассматриваемом поперечном сечении:

$$T_R = l_{sh} \cdot b \cdot f_{v,d}, \quad (8)$$

где  $l_{sh}$  — длина участка сдвига.

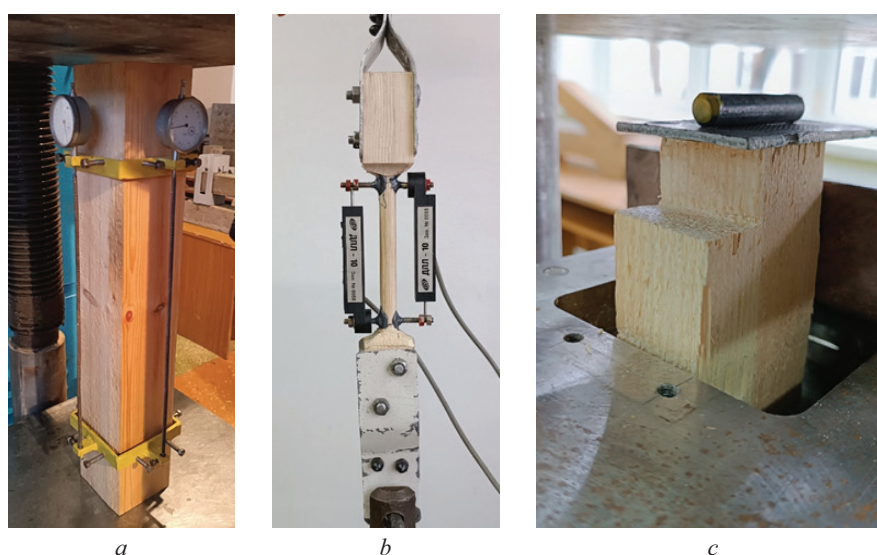
Критерием исчерпания прочности деревянного элемента при изгибе в растянутой или сжатой зонах принимается максимальное значение внутреннего усилия, при котором соблюдаются условия равновесия внутренних усилий системы уравнений (3). Невыполнение условия (7) свидетельствует о разрушении элемента при сдвиге древесины вдоль волокон. При этом, учитывая изменение размеров площадки возможного сдвига и сдвигающего усилия от внешней нагрузки, следует рассматривать

ряд поперечных сечений по длине изгибаемого деревянного элемента.

Верификация предложенной методики расчета проводилась на данных собственных экспериментальных исследований деревянных элементов при поперечном изгибе.

Экспериментальные образцы представляли собой шарнирно опертые деревянные балки поперечного сечения  $100 \times 150$  мм длиной 3000 мм (расстояние между опорами 2700 мм). Для определения фактических физико-механических характеристик при сжатии, растяжении, сдвиге вдоль волокон в тангенциальном направлении древесины были отобраны образцы из той же партии древесины, что и опытные балки (порода древесины — сосна). В результате испытания призм размером  $100 \times 100 \times 600$  мм при сжатии вдоль волокон (рис. 3, а), образцов-восьмерок при растяжении вдоль волокон (рис. 3, б) и Т-образных при сдвиге вдоль волокон (рис. 3, в) получены характеристики древесины для каждой балки. Испытание всех опытных образцов проходило при температуре окружающего воздуха  $20^\circ\text{C}$ , относительной влажности 66 %. Влажность древесины на момент проведения испытаний составляла в среднем 9,4 %. Прочностные характеристики балок приведены в табл. 1.

В процессе испытания опытные балки нагружались двумя сосредоточенными силами в 1/3 (серия 1) и в 1/4 (серия 2) пролета (рис. 4, а). Было испытано по 2 балки каждой серии. Нагружение балок осуществлялось гидравлическим домкратом через распределительную traversу этапами не более 1/20 предполагаемого предельного усилия с выдержкой на каждом этапе 3 минуты. На последних этапах нагружения, когда начали проявляться деформации



**Рис. 3.** Испытание деревянных призм при сжатии вдоль волокон (а); образцов-восьмерок при растяжении вдоль волокон (б) и образцов при сдвиге вдоль волокон (в) для определения характеристик древесины

**Fig. 3.** Testing of wooden prisms under compression along the fibres (a); figure-of-eight specimens under tension along the fibres (b) and specimens under shear along the fibres (c) to determine the characteristics of wood

Табл. 1. Прочностные характеристики опытных балок  
Table 1. Strength characteristics of experimental beams

Балки / Beams	$f_{c,0,m}$ , МПа / МПа	$E_{c,0,m}$ , МПа / МПа	$\epsilon_{c,0,1}$	$f_{t,0,m}$ , МПа / МПа	$E_{t,0,m}$ , МПа / МПа	$\epsilon_{t,0,u}$	$f_{v,m}$ , МПа / МПа
Б1–1 В1–1	61,8	14 250	0,0043	108,7	17 960	0,0061	2,15
Б2–1 В2–1	54,9	14 490	0,0038	109,5	18 510	0,006	2,14
Б3–2 В3–2	47,2	15 660	0,003	55,2	17 490	0,0031	2,2
Б4–2 В4–2	33,5	12 200	0,0031	60,7	18 100	0,0034	1,98

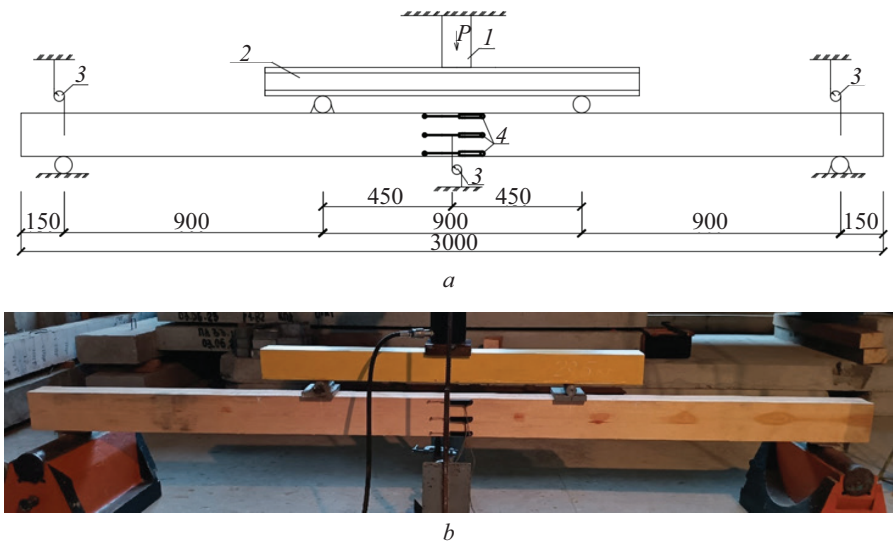


Рис. 4. Схема расстановки приборов (а) и общий вид испытания опытной балки (b); 1 — гидравлический домкрат; 2 — распределительная траверса; 3 — прогибомер; 4 — измерители деформаций  
Fig. 4. Arrangement diagram (a) and general test view of the pilot beam (b); 1 — hydraulic jack; 2 — distribution beam; 3 — deflection gauge; 4 — strain gauges

ползучести, величина нагрузки, соответствующая этапу нагружения, уменьшалась вдвое. При испытании на каждом этапе в середине пролета контролировались относительные деформации в пяти местах по высоте поперечного сечения с помощью измерителей деформаций с базой измерения 145 мм. Прогиб балки в середине пролета и осадка опор измерялись прогибомерами с точностью 0,01 мм. Общий вид испытания опытной балки показан на рис. 4, b.

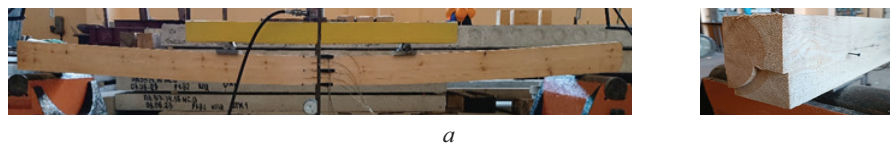
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрушение опытных балок первой серии произошло от сдвига древесины вдоль волокон по поверхности годовичных колец при максимальном изгибающем моменте в зоне чистого изгиба для балок:

Б1–1  $M_{u,exp} = 24,75$  кНм, Б2–1  $M_{u,exp} = 25,31$  кНм. Балки второй серии разрушились от разрыва крайних растянутых волокон древесины и смятия сжатых волокон при нагрузке, соответствующей изгибающему моменту для балок: Б3–2  $M_{u,exp} = 16,45$  кНм, Б4–2  $M_{u,exp} = 17,3$  кНм.

Общие виды опытных балок после испытания представлены на рис. 5.

Наглядность последовательности расчета на сдвиг по предложенной методике рассмотрим на примере опытной балки Б1–1. При моделировании НДС балки на каждом этапе нагружения проанализирован ряд поперечных сечений по длине сдвига от опоры до точки приложения нагрузки, получены значения нормальных напряжений по высоте сечений (рис. 6, 7),



а



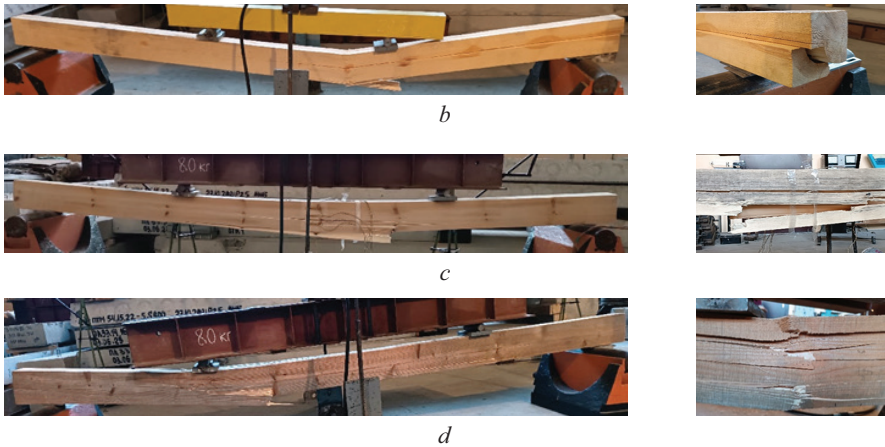


Рис. 5. Общий вид опытных балок после испытания и мест их разрушения: *a* — B1–1; *b* — B2–1; *c* — B3–2; *d* — B4–2  
Fig. 5. General view of the experimental beams after testing and the places of their destruction: *a* — B1–1; *b* — B2–1; *c* — B3–2; *d* — B4–2

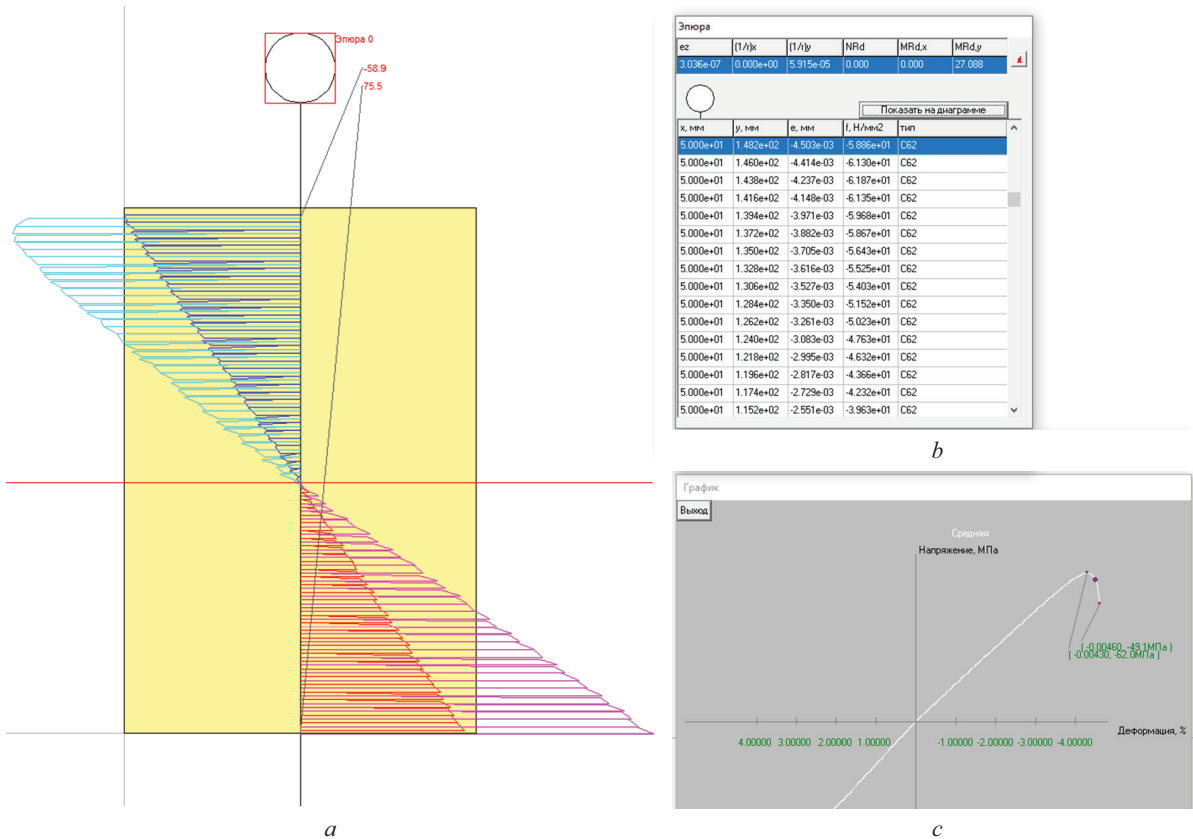


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние в критическом поперечном сечении изгибаемого деревянного элемента по результатам расчета: *a* — распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения при изгибающем моменте  $M_{u,calc} = 27,09$  кНм (цифры на выносных линиях — нормальные напряжения в МПа; синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, нормальных напряжений); *b* — результаты расчета; *c* — диаграмма деформирования древесины при предельном изгибающем моменте (красная точка на кривой — деформации при заданном нагружении)

Fig. 6. Stress-strain state in the critical cross-section of the bending wooden element according to the calculation results: *a* — is the distribution of relative deformations and normal stresses over the height of the cross-section at a bending moment of  $M_{u,calc} = 27.09$  kNm (the numbers on the outrigger lines are normal stresses in MPa; blue and red show the distribution over the height of the cross-section of relative deformations in compressed and stretched zones, respectively; blue and pink — similarly, normal stresses); *b* — calculation results; *c* — diagram of wood deformation at the maximum bending moment (the red dot on the curve shows deformations under a given load)

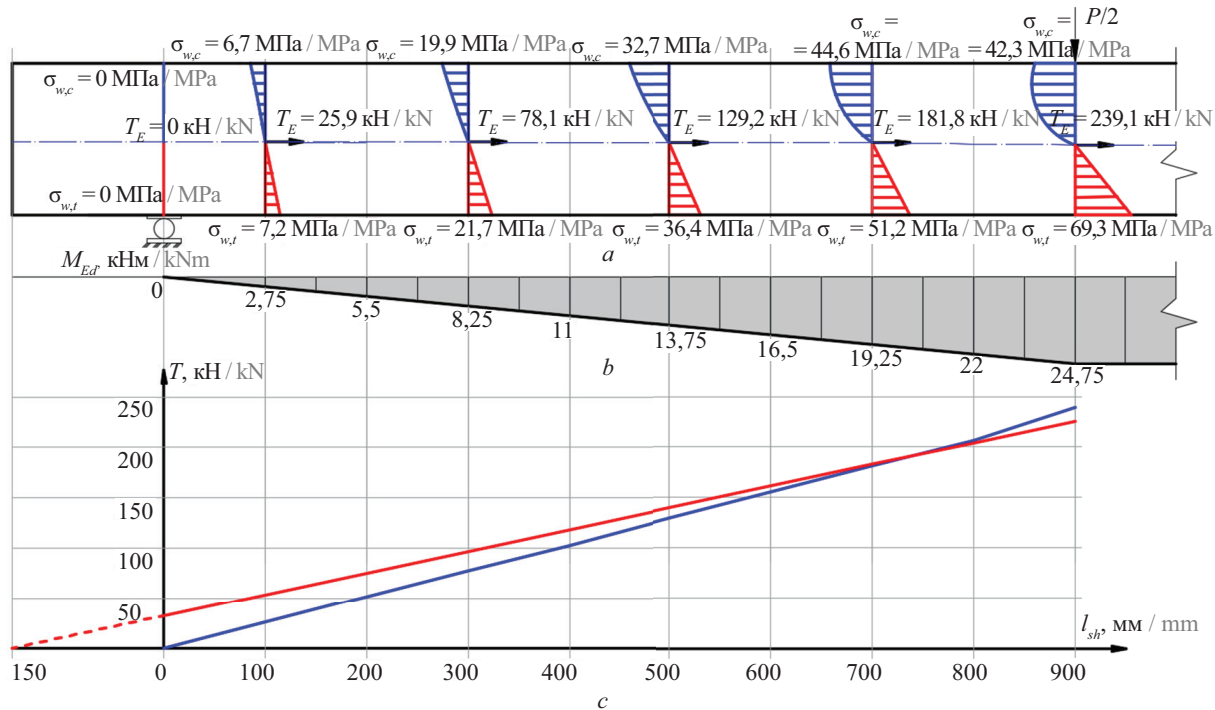
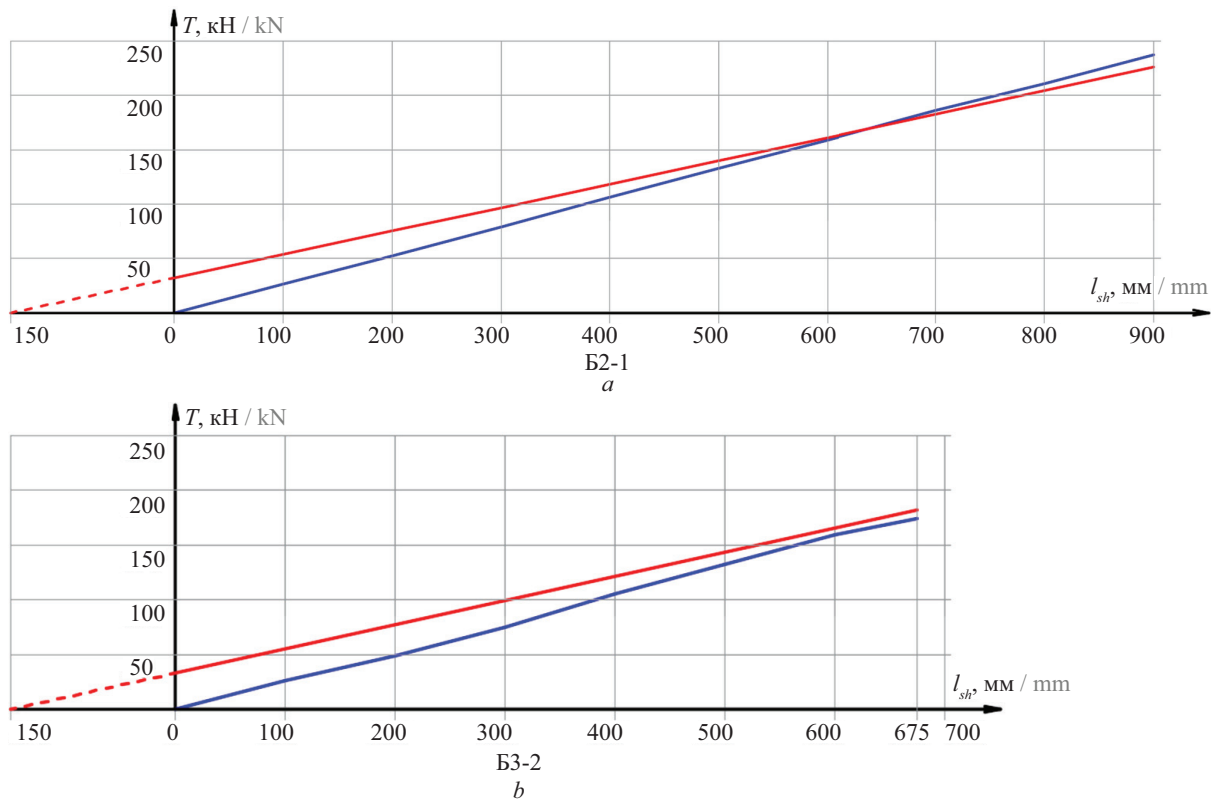
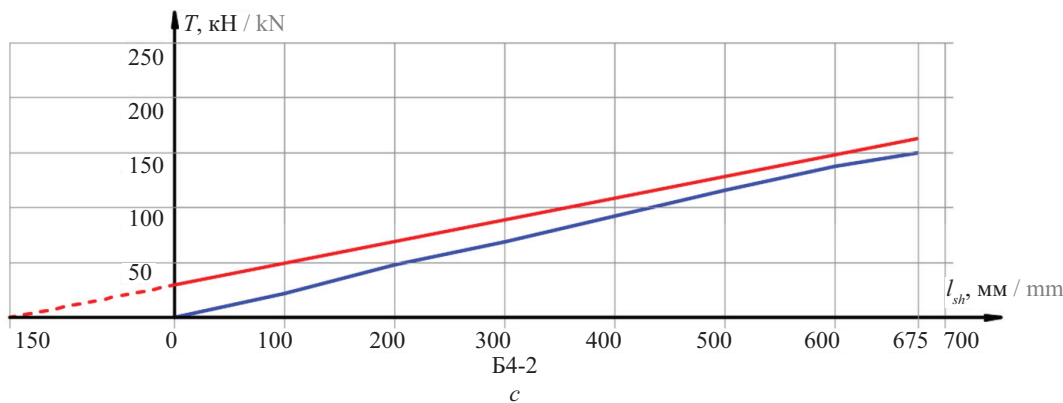


Рис. 7. Результаты расчета прочности балки Б1 при изгибе с учетом сдвига: а — распределение нормальных напряжений и сдвигающих усилий, полученных по предложенной методике; б — эпюра изгибающих моментов; в — зависимость сдвигающего усилия от длины площадки сдвига (на графике красная линия — зависимость  $T_R(l_{sh})$ , построенная с учетом испытания древесины на сдвиг; синяя —  $T_E(l_{sh})$  — по предложенной методике)

Fig. 7. The results of calculating the strength of the beam B1 during bending, taking into account the shear: a — is the distribution of normal stresses and shear forces obtained by the proposed method; b — is a diagram of bending moments; c — is the dependence of the shear force on the length of the shear site (on the graph, the red line is the dependence  $T_R(l_{sh})$ , based on the shear test of wood; blue is  $T_E(l_{sh})$  — according to the proposed method)





**Рис. 8.** Зависимость сдвигающего усилия от длины площадки сдвига: *a* — Б2–1; *b* — Б3–2; *c* — Б4–2 (на графиках красная линия —  $T_R(l_{sh})$ ; синяя —  $T_E(l_{sh})$ )

**Fig. 8.** Dependence of the shear force on the length of the shear area: *a* — B2–1; *b* — B3–2; *c* — B4–2 (in the graphs, the red line is  $T_R(l_{sh})$ ; the blue line is  $T_E(l_{sh})$ )

**Табл. 2.** Результаты экспериментально-теоретических исследований

**Table 2.** Results of experimental and theoretical studies

Балки Beams	Тип разрушения Type of destruction	$M_{u,exp}$ , кНм / kNm	$M_{u,calc}$ , кНм / kNm	$M_{u,exp} / M_{u,calc}$
Б1–1 B1–1	Сдвиг вдоль волокон Shifting along the fibres	24,75	23,6	1,05
Б2–1 B2–1	Сдвиг вдоль волокон Shifting along the fibres	25,31	24,73	1,02
Б3–2 B3–2	Разрыв и смятие волокон Tearing and crumpling of fibres	17,3	16,98	1,02
Б4–2 B4–2	Разрыв и смятие волокон Tearing and crumpling of fibres	16,45	16,2	1,02

вычислены результирующие продольные усилия в сжатой зоне, которые и являются сдвигающими  $T_E$  в рассматриваемом поперечном сечении.

По результатам расчета максимальное значение изгибающего момента составило  $M_{u,calc,max} = 27,16$  кНм, при этом максимальное значение результирующего сдвигающего усилия при данном изгибающем моменте —  $T_{E,max} = 264,6$  кН, что превысило  $T_{R,max} = 225,75$  кН. Таким образом, за предельный принимается изгибающий момент  $M_{u,calc} = 23,6$  кНм, при котором  $T_E = T_{R,max}$ , а критерием разрушения принимается сдвиг древесины вдоль волокон (рис. 7).

Как видно из зависимостей на (рис. 7, *c*), сдвигающее усилие  $T_E$  от действия поперечной нагрузки, вычисленное по предложенной методике, превышает сдвигающее усилие сопротивления балки сдвигу  $T_R$  по длине площадки сдвига от места пересечения графиков  $T_R(l_{sh})$  и  $T_E(l_{sh})$  до линии действия поперечного усилия. Предложенная методика позволяет получить реальное распределение сдвигающего усилия от внешней нагрузки на любом участке балки с учетом нелинейной работы древесины при сжатии на любой стадии нагружения. Аналогично были построены зависимости сдвигающего усилия от длины площадки сдвига для балок Б2–1, Б3–2 и Б4–2 (рис. 8).

Результаты расчетов прочности экспериментальных балок представлены в табл. 2.

Анализ результатов свидетельствует о возможности применения предложенного подхода для проверки прочности деревянных конструкций при их поперечном изгибе с учетом сдвига на основе нелинейной деформационной модели сечений. В расчете прочности на сдвиг изгибаемых деревянных элементов следует принимать сопротивление древесины при сдвиге в тангенциальном направлении (по годичным кольцам) как самое неблагоприятное.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ**

На основе нелинейной деформационной модели предложен подход для определения прочности на сдвиг при поперечном изгибе деревянных элементов. Данный подход позволяет получить распределение сдвигающих усилий по длине площадки сдвига изгибаемого элемента на любой стадии нагружения с учетом нелинейной работы древесины при сжатии.

Предложен критерий разрушения изгибаемого элемента при изгибе с учетом сдвига в виде максимального воспринимаемого изгибающего момента в поперечном сечении, либо достижением предельного усилия при сдвиге.

Экспериментально установлены схемы разрушения древесины при сдвиге, которые заключаются в сдвиге волокон не по плоскости в нейтральной зоне, а по годичным кольцам древесины. В расчете

прочности на сдвиг изгибаемых деревянных элементов следует принимать сопротивление древесины при сдвиге в тангенциальном направлении их поперечного сечения (по годичным кольцам) как самое неблагоприятное.

Результаты проведенного экспериментально-теоретического исследования подтверждают применимость нелинейного деформационного подхода к расчету сопротивления изгибу деревянных эле-

ментов с учетом сдвига. Результаты расчета прочности показывают удовлетворительную сходимость с опытными данными (расхождения с опытными данными не превышают 5 %).

В дальнейшем следует рассмотреть вопросы учета сдвига при изгибе клееных деревянных элементов, состоящих из древесины с различными физико-механическими свойствами, с различной ориентацией слоев клееной древесины (CLT-элементы).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Диаграммный подход при расчете деревянных конструкций по СП 5.05.01-2021 // Вестник БрГТУ. 2024. № 2 (134). С. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. EDN DKHHQX.

2. Koczan G., Kozakiewicz P. The role of shear stress in the bending strength test of short and medium length specimens of clear wood // *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*. 2017. Vol. 60. Issue 199. Pp. 161–175. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.102.12

3. Arroyo F.N., Borges J.F., Pereira Junior W.M., Santos H.F., Oliveira I.A., Panzera T.H. et al. Estimation of flexural tensile strength as a function of shear of timber structures // *Forests*. 2023. Vol. 14. Issue 8. P. 1552. DOI: 10.3390/f14081552

4. Жилкин В.А. Численное исследование напряженного состояния образцов из древесины на скалывание вдоль волокон // АПК России. 2015. Т. 74. С. 55–65. EDN VKBAHP.

5. Yang S.M., Lee H.H., Kang S.G. Research trends in hybrid cross-laminated timber (CLT) to enhance the rolling shear strength of CLT // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021. Vol. 49. Issue 4. Pp. 336–359. DOI: 10.5658/WOOD.2021.49.4.336

6. Малыхина В.С., Денисов А.Н. Исследование смятия и скалывания соединения деревянных элементов конструкции без механических связей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 72–74. EDN WHTDIF.

7. Артемов П.Я. Некоторые вопросы скалывания древесины // Сборник научных трудов. Минск : Издательство Белгосуниверситета имени В.И. Ленина, 1956. № VIII. С. 204–213.

8. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams — State of the art // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 97. Pp. 2–13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021

9. Zhang L., Xu B., Fang Z., Li C., Kong X., Li Q., Guo K. Experimental Study on the Bending and Shear Behaviors of Chinese Paulownia Wood at Elevated Tem-

peratures // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Issue 24. P. 5545. DOI: 10.3390/polym14245545

10. Rammer D.R., McLean D.I. Shear strength of wood beams // *National conference on wood transportation structures*. 1996. Pp. 168–177.

11. Коротков Л.И. Брус клееный из деревянного шпона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 6 (185). С. 38–41. EDN TAPWFX.

12. Деордиев С.В., Копаница Д.Г., Копаница Г.Д., Тутатчиков П.С. Экспериментальные исследования клеодощатых балок на поперечный изгиб при действии статической и кратковременной динамической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 96–111. EDN SEZISL.

13. Li Q., Wang Z., Liang Z., Li L., Gong M., Zhou J. Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. P. 120504. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120504

14. Хаткевич А.М., Лазовский Д.Н., Глухов Д.О. Деформационный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 3. С. 21–27. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27. EDN PJQNXA.

15. Лазовский Д.Н., Гиль А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния двухслойных железобетонных изгибаемых элементов с различными видами армирования в растянутой зоне // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 5 (785). С. 36–48. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-36-48. EDN CNSHUR.

16. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483. EDN AOVNPO.

17. Gomon S., Gomon P., Korniychuck O., Honmon S., Dovbenko T., Kulakovskiy L. et al. Fundamentals



of calculation of elements from solid and glued timber with repeated oblique transverse bending, taking into account the criterion of deformation // *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2022. Vol. 64. Issue 2. Pp. 37–47. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.04

18. Pavluk A., Gomon S., Khoruzhyi M., Homon S., Dejneka O., Smal M. et al. Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 566–574. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.080

19. Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Y. Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the moment-curvature graph // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 48. Pp. 195–200. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.148

20. Lazouski D., Glukhov D., Lazouski Y., Hil A. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load // *Sustainable and Digital Building*. 2023. Pp. 279–289. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7\_22

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 22 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Лазовский** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

**Артур Иванович Гиль** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907375; ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

**Дмитрий Олегович Глухов** — кандидат технических наук, доцент, главный инженер-программист; **СофтКлуб**; 220141, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 168/1; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Lazouski D.N., Hil A.I., Gluhov D.O. Diagram approach in calculating wooden design for SP 5.05.01-2021. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2024; 2(134):66-72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. EDN DKHHQX. (rus.).

2. Koczan G., Kozakiewicz P. The role of shear stress in the bending strength test of short and medium length specimens of clear wood. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*. 2017; 60(199):161-175. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.102.12

3. Arroyo F.N., Borges J.F., Pereira Junior W.M., Santos H.F., Oliveira I.A., Panzera T.H. et al. Estimation of flexural tensile strength as a function of shear of timber structures. *Forests*. 2023; 14(8):1552. DOI: 10.3390/f14081552

4. Zhilkin V.A. The stress state numerical investigation of wood samples for shearing parallel to fibers. *Agro-industrial complex of Russia*. 2015; 74:55-65. EDN VKBAHP. (rus.).

5. Yang S.M., Lee H.H., Kang S.G. Research trends in hybrid cross-laminated timber (CLT) to enhance the rolling shear strength of CLT. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021; 49(4):336-359. DOI: 10.5658/WOOD.2021.49.4.336

6. Malykhina V.S., Denisov A.N. Study of crushing and shearing of the connection of wooden structural elements without mechanical connections. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 8:72-74. EDN WHTDIF. (rus.).

7. Artemov P.Ya. Some issues of wood chipping. *Collection of scientific papers*. Minsk, Publishing House of the Belarusian State University named after V.I. Lenin, 1956; VIII:204-213. (rus.).

8. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams — State of the art. *Construction and Building Materials*. 2015; 97:2-13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021

9. Zhang L., Xu B., Fang Z., Li C., Kong X., Li Q., Guo K. Experimental Study on the Bending and Shear Behaviors of Chinese Paulownia Wood at Elevated Temperatures. *Polymers*. 2022; 14(24):5545. DOI: 10.3390/polym14245545

10. Rammer D.R., McLean D.I. Shear strength of wood beams. *National conference on wood transportation structures*. 1996; 168-177.

11. Korotkov L.I. The laminated wooden veneer. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2014; 6(185):38-41. EDN TAPWFX. (rus.).

12. Deordiev S.V., Kopanitsa D.G., Kopanitsa G.D., Tutatchikov R.S. Transverse bending tests of laminated beams under static and short-term dynamic loads. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 3(44):96-111. EDN SEZISL. (rus.).

13. Li Q., Wang Z., Liang Z., Li L., Gong M., Zhou J. Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Construction and Building Materials*. 2020; 261:120504. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120504

14. Khatkevich A., Lazouski D., Glukhov D. A deformation approach to modeling the stress-strain state of compressed brickwork elements reinforced under load with a reinforced concrete cage. Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. *Applied Sciences*. 2023; 3:21-27. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27. EDN PJQNXA. (rus.).

15. Lazovsky D.N., Gil A.I. Modeling of the stress-strain state of two-layer reinforced concrete bendable elements with different types reinforcement in a stretched area. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 5(785):36-48. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-36-48. EDN CNSHUR. (rus.).

16. Lazouski D.N., Hil A.I., Hlukhau D.O. Deformation approach to the calculation of compressive

strength of steel-reinforced concrete elements. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(9):1469-1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483. EDN AOVNPO. (rus.).

17. Gomon S., Gomon P., Korniychuck O., Homon S., Dovbenko T., Kulakovskiy L. et al. Fundamentals of calculation of elements from solid and glued timber with repeated oblique transverse bending, taking into account the criterion of deformation. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2022; 64(2):37-47. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.04

18. Pavluk A., Gomon S., Khoruzhyi M., Homon S., Dejneka O., Smal M. et al. Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model. *Procedia Structural Integrity*. 2024; 59:566-574. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.080

19. Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Y. Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the moment-curvature graph. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 48:195-200. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.148

20. Lazouski D., Glukhov D., Lazouski Y., Hil A. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load. *Sustainable and Digital Building*. 2023; 279-289. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7\_22

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on May 22, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

**B I O N O T E S:** **Dzmitry N. Lazouski** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU)**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

**Artur I. Hil** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU)**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907375; ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

**Dzmitry O. Hlukhau** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Software Engineer; **SoftClub**; 168/1 Nezavisimosti st., Minsk, 220141, Republic of Belarus; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.*

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

## Фторидно-боратные смеси как интенсификатор вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций

Борис Михайлович Гольцман, Елена Альфредовна Яценко,  
Анна Александровна Тимофеева, Полина Александровна Скубовская,  
Виктория Александровна Смолий

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); Ростовская область, г. Новочеркасск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследована возможность интенсификации процесса вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций (ТЭС) путем введения смеси плавней (флюсов), состоящей из тетрабората натрия ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) и фторида натрия ( $\text{NaF}$ ). Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективной утилизации промышленных отходов и получения на их основе строительных материалов с улучшенными характеристиками. Научная новизна работы заключается в изучении совместного влияния данных плавней на процессы вспенивания и формирование пористой структуры материала. Цель исследования — оптимизация состава флюсующей смеси для снижения температуры плавления и повышения качества пористых силикатных материалов.

**Материалы и методы.** Использованы методы рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии, микроскопического анализа и экспериментального определения плотности образцов.

**Результаты.** Проведено изучение изменений температурных режимов спекания и вспенивания при совместном введении смесей  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  и  $\text{NaF}$ , а также их влияния на структурные и фазовые характеристики материалов. Показано, что тетраборат натрия способствует равномерному распределению пор и формированию аморфной стеклофазы. Фторид вызывает интенсивное оплавление структуры при повышенных температурах, а также рекристаллизацию расплава с формированием кристаллов альбита. Выявлено оптимальное соотношение плавней, обеспечивающее минимальную плотность, стабильную пористую структуру и формирование стеклокристаллического каркаса, способствующего повышению прочности.

**Выводы.** Полученные результаты демонстрируют перспективность метода утилизации шлаковых отходов ТЭС для получения пористых строительных материалов по технологии «самовспенивания». Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию флюсующих смесей и изучение способов активации золошлаковых отходов для улучшения технологических характеристик получаемых изделий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пористый утеплитель, шлак ТЭС, самовспенивание, плавень, бура, фторид натрия, рециклинг отходов

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 23-79-01004. Также авторы благодарят анонимных рецензентов за объективную оценку работы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Гольцман Б.М., Яценко Е.А., Тимофеева А.А., Скубовская П.А., Смолий В.А. Фторидно-боратные смеси как интенсификатор вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1199–1210. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1199-1210

**Автор, ответственный за переписку:** Борис Михайлович Гольцман, b.goltsman@npi-tu.ru.

## Fluoride-borate mixtures as a foaming intensifier for TPP slag wastes

Boris M. Goltsman, Elena A. Yatsenko, Anna A. Timofeeva, Polina A. Skubovskaya,  
Victoria A. Smoliy

*M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI);  
Rostov region, Novocherkassk, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The possibility of intensifying the foaming process of thermal power plant (TPP) slag waste by introducing a mixture of fluxes consisting of sodium tetraborate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) and sodium fluoride ( $\text{NaF}$ ) was studied. The relevance of the study is due to the need for efficient recycling of industrial waste and the production of building materials with improved characteristics based on them. The scientific novelty of the work lies in the study of the combined effect of these fluxes on the foaming processes and the formation of the porous structure of the material. The purpose of the study is to optimize the composition of the fluxing mixture to reduce the melting point and improve the quality of porous silicate materials.

**Materials and methods.** The methods of X-ray phase analysis (XRD), infrared spectroscopy (FTIR), microscopic analysis and experimental determination of the density of specimens were used.

**Results.** A study of changes in the temperature modes of sintering and foaming with the combined introduction of  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  and NaF mixtures was performed, as well as their effect on the structural and phase characteristics of the materials. It was shown that sodium tetraborate promotes uniform distribution of pores and formation of amorphous glass phase. Fluoride causes intensive melting of the structure at elevated temperatures, as well as recrystallization of the melt with formation of albite crystals. The optimal ratio of fluxes was revealed, providing minimum density, stable porous structure and formation of glass-crystalline framework, which contributes to increased strength.

**Conclusions.** The obtained results demonstrate the prospects of the method of recycling slag waste of thermal power plants for obtaining porous building materials using the "self-foaming" technology. Further research can be aimed at optimizing fluxing mixtures and studying the methods of activating ash and slag waste to improve the technological characteristics of the resulting products.

**KEYWORDS:** porous thermal insulator, TPP slag, self-foaming, flux, borax, sodium fluoride, waste recycling

**Acknowledgements.** The work was performed with the financial support of the Russian Science Foundation, Agreement No. 23-79-01004. The authors also thank the anonymous reviewers for an objective assessment of the work.

**FOR CITATION:** Goltsman B.M., Yatsenko E.A., Timofeeva A.A., Skubovskaya P.A., Smoliy V.A. Fluoride-borate mixtures as a foaming intensifier for TPP slag wastes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1199-1210. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1199-1210 (rus.).

*Corresponding author:* Boris M. Goltsman, b.goltsman@npi-tu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Поиск и исследование новых источников сырья для производства строительных материалов являются одной из важнейших задач строительного материаловедения. Наиболее перспективная область для решения этой задачи — техногенные отходы различных производств. Их применение позволяет одновременно решить комплекс проблем: 1) получение полезной продукции без затрат невозполняемых природных ресурсов; 2) снижение экологической нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения объема отходов производства; 3) вовлечение в производственный цикл и переработка крупнотоннажных промышленных отходов.

Поскольку различные строительные материалы предъявляют различные требования к составу и свойствам сырья, то в качестве него могут использоваться разные виды отходов. Часто в таком качестве выступают отходы стройиндустрии: бой кирпича, стеклоотходы, отходы цемента и т.д. [1–6]. Помимо этого, как сырье применяется широчайший ряд техногенных отходов: металлургические шлаки, отходы добычи и обогащения руд и горных пород, отходы энергетики, химической промышленности и др. [7–11].

Из всего спектра строительных материалов особо выделяется класс пористых (вспененных) силикатных материалов (наиболее известным из которых служит пеностекло), получаемый за счет термической поризации вязкого силикатного или алюмосиликатного расплава. Эти материалы обладают отличными теплоизоляционными свойствами, а также уникальным комплексом характеристик: полная негорючесть, химическая и биологическая стойкость, долговечность и др. При этом их получение возможно на основе широкого спектра сырья. Чаще всего для получения пористых силикатов используют отходы стекла, в том числе листового, тарного, ЭЛТ и др. [12, 13]. Кроме этого, в качестве основного сырья

применяют различные виды промышленных алюмосиликатных отходов [14–16].

Из всех применяемых в качестве сырья вторичных техногенных материалов особо выделяются отходы от сжигания угля на тепловых электростанциях (ТЭС) [17]. Они образуются при плавлении негорючей минеральной части углей и преимущественно состоят из оксидов кремния, алюминия и железа. Можно выделить два вида отходов: зола-уноса (летучая зола) и котельный шлак. Зола активно используется как добавка в различные виды цемента, однако шлак не нашел сравнимого применения. Его используют лишь в небольших объемах в качестве заполнителя в дорожном строительстве или получении тяжелых бетонов. В то же время шлаки представляют собой стекловидный материал, прошедший термическую обработку, что делает его перспективным сырьем для синтеза обжиговых строительных материалов.

Еще одна важная особенность шлака — наличие в нем так называемого «недожога», т.е. остаточного углерода. Этот углерод может выступать в виде выгорающего компонента при производстве поризованных изделий. Такой метод позволяет получать вспененные силикатные материалы по технологии «самовспенивания», т.е. не за счет введения дополнительных, часто достаточно дорогих порообразующих добавок, а за счет газообразующих примесей в самом сырье. Для этой цели подходят материалы, содержащие соединения, которые сгорают или разлагаются с выделением газообразных продуктов. В основном это карбонаты и углеродсодержащие вещества [16, 18–20].

Отходы сжигания угля содержат от 3 до 10 мас. % углеродного «недожога», что делает их отличным сырьем для получения пористых материалов по технологии «самовспенивания». Ключевой проблемой в данном процессе является высокая температура плавления шлака, превышающая 1400 °С, что связано с высоким содержанием тугоплавкого оксида алюминия. Эту проблему можно решить



путем добавления к шлаку флюсующих добавок или плавней, т.е. веществ, снижающих температуру плавления основного сырья и интенсифицирующих спекание и вспенивание образцов. Ранее [21] было показано, что введение 4–5 мас. % тетрабората натрия (буры)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  обеспечивает вспенивание шлакового отхода с получением пористых материалов с плотностью ниже  $450 \text{ кг/м}^3$ . Однако известно также, что перспективным плавнем выступает фторид натрия  $\text{NaF}$ , обеспечивающий интенсивное плавление алюмосиликатного сырья [22–25].

Цель настоящего исследования — возможности интенсификации вспенивания шлаковых отходов ТЭС путем совместного введения добавок буры и фторида натрия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным сырьевым материалом был шлаковый отход Новочеркасской ГРЭС, химический состав которого представлен в табл. 1 (приведены компоненты, содержание которых больше 0,2 мас. %). В качестве добавок плавней использовались тетраборат натрия безводный (бура)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  и фторид натрия  $\text{NaF}$ , составы которых также приведены в табл. 1.

Синтез образцов включал следующие этапы: подготовка сырья, получение сырьевой смеси и формование образцов, термическая обработка, механическая обработка. Перед формованием все сырьевые материалы подвергали помолу до размера частиц менее 125 мкм. Затем производили смешивание компонентов смеси, согласно табл. 2, добавляли 5 мас. %

воды (сверх 100) для обеспечения формовочных свойств и перемешивали в течение 30 мин. Название состава указывает на содержание буры, т.е., например, состав В2 содержит 2 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ .

Полученную смесь равномерно загружали в кубическую форму с длиной грани 20 мм и производили уплотнение смеси пуансоном, используя постоянное давление 3 МПа. Отформованные образцы перемещали на огнеупорную подставку, которую помещали в муфельную печь для обжига. Процесс обжига проводили согласно следующему температурно-временному режиму. Образцы загружали в холодную печь и нагревали со скоростью  $15 \text{ }^\circ\text{C/мин}$  до заданной температуры обжига ( $1000\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с выдержкой при данной температуре 40 мин. Далее следовало самопроизвольное охлаждение вместе с печью в течение 5–7 ч.

Плотность образцов  $d$ ,  $\text{кг/м}^3$ , определяли по формуле:

$$d = m/(abc), \tag{1}$$

где  $m$  — масса образца, кг;  $a$  — длина образца, м;  $b$  — ширина образца, м;  $c$  — высота образца, м.

Микроструктуру образцов изучали с помощью оптического стереомикроскопа SZM-110 (КС-Нано, РФ). Инфракрасную спектроскопию образцов осуществляли с использованием ИК-Фурье спектрометра WQF-530 (Rayleigh, КНР). Качественный рентгенофазовый анализ синтезированных образцов исследовали на дифрактометре ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific, США), являющемся частью ЦКП «Нанотехнологии» Южно-Российского государ-

Табл. 1. Химический состав сырьевых материалов

Table 1. Chemical composition of raw materials

Материал / Material	Содержание компонентов, мас. % Content of components, wt. %										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaF	ППП LOI
Шлаковый отход Slag waste	56,1	22,0	10,6	2,1	3,0	1,1	3,6	0,9	–	–	0,4
Тетраборат натрия Sodium tetraborate	–	–	–	–	–	30,8	–	–	69,2	–	–
Фторид натрия Sodium fluoride	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–

Табл. 2. Разработанные смеси

Table 2. Developed mixtures

Материал / Material	Содержание компонента, мас. %, в составе, номер Content of the component, wt. %, in the composition, number					
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
Шлаковый отход Slag waste	100					
Тетраборат натрия (сверх 100) Sodium tetraborate (over 100)	0	1	2	3	4	5
Фторид натрия (сверх 100) Sodium fluoride (over 100)	5	4	3	2	1	0

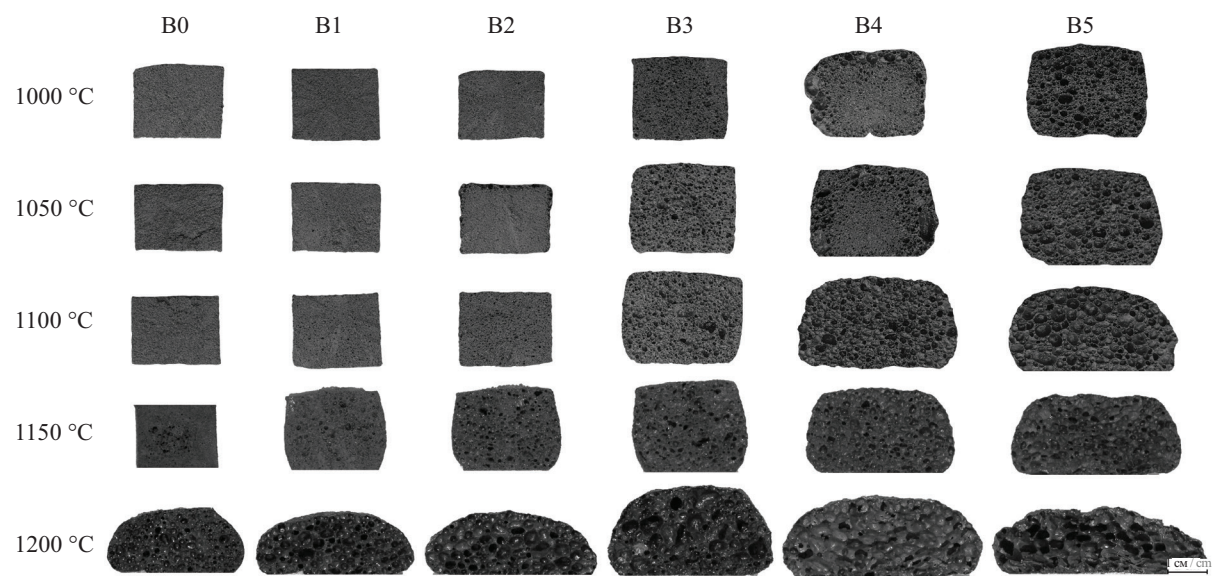


Рис. 1. Внутренняя структура образцов  
Fig. 1. Internal structure of specimens

ственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Интерпретацию полученных результатов выполнили с помощью программного обеспечения базы данных ICDD PDF 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен обжиг разработанных составов в диапазоне температур 1000–1200 °C с шагом 50 °C. Результаты исследования внутренней структуры представлены на рис. 1, изменение плотности образцов — на рис. 2.

Из рис. 1, 2 видны следующие закономерности изменения интенсивности спекания, плавления и вспенивания составов. Повышение температуры обжига ведет к двум последовательным изменениям. Сначала происходит стягивание частиц образца, обусловленное его спеканием, и соответствующее повышение плотности. Дальнейший нагрев ведет к снижению вязкости материала до вязкопластичного состояния, обеспечивающего начало вспенивания за счет давления газов от разложения углеродного компонента.

Такая общая закономерность особенно ярко выражена для смесей плавней с преобладанием фторида. К примеру, для состава B0 (5 мас. % NaF, 0 мас. % Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) нагрев вызывает следующие изменения. Повышение температуры обжига ведет к постепенному повышению плотности до 1373 кг/м<sup>3</sup> при 1150 °C, что указывает на максимальную степень спекания. Обжиг при 1200 °C приводит к резкому снижению плотности за счет понижения вязкости материала и его вспенивания. Данная тенденция на повышение плотности значительно слабее выражена у составов с преобладанием Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>. Бура показывает себя как стабильный эффективный плавень, который приводит к вспениванию уже при 1000 °C, а с повышении

ем температуры обеспечивает постепенное снижение вязкости и повышение интенсивности вспенивания.

Интересно, что флюсующий эффект фторида резко проявляется при 1150 °C и при нагревании до 1200 °C образец полностью теряет форму и расплавляется, оседая под собственным весом. Исходя из этого, можно предположить, что наиболее эффективным будет использование смесей с преобладанием Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, но содержащих небольшие количества NaF. Это обеспечит формирование равномерной пористой структуры образцов, причем воздействие буры на последних этапах вспенивания будет интенсифицировано высокоактивным фторидом натрия. Такое предположение подтверждается полученными результатами, где наименьшей плотностью 378 кг/м<sup>3</sup> обладал обра-

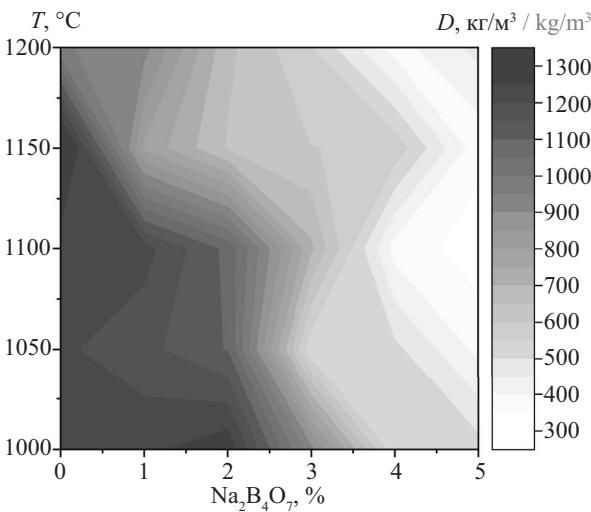


Рис. 2. Изменение плотности образцов  
Fig. 2. Changes of the specimens' density

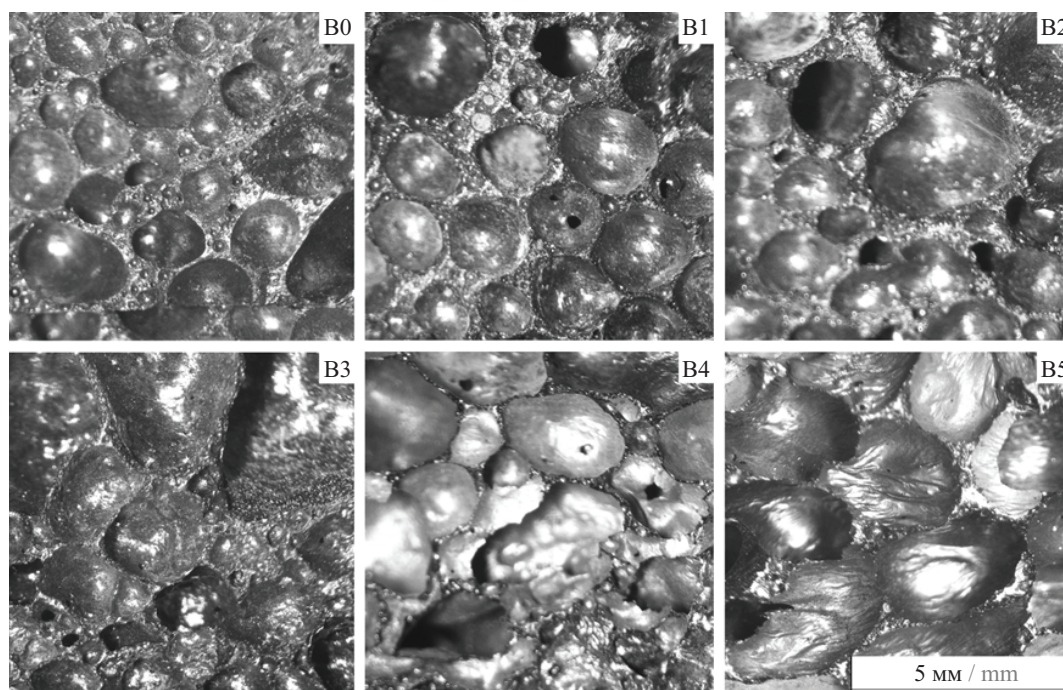


Рис. 3. Результаты микроскопического анализа образцов

Fig. 3. Results of microscopic analysis of the specimens

зец состава В4 (4 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 1 мас. %  $\text{NaF}$ ), обожженный при 1200 °С.

Для исследования микроструктуры образцов выполнен микроскопический анализ, результаты которого представлены на рис. 3.

Микроскопический анализ образцов, обожженных при 1200 °С, позволяет уточнить ряд особенностей изменения пористой структуры. Образец с добавкой в качестве плавня 5 мас. %  $\text{NaF}$  (состав В0) обладает мелкопористой структурой с преобладанием пор размерами 0,15–0,4 и 1,1–2,1 мм. Повышение содержания буры ведет к увеличению размера пор и снижению их равномерности. Так, средний размер пор в ряду В1–В2–В3 увеличивается до 1,6, 1,8 и 2,3 мм соответственно. Поверхность образцов при этом остается гладкой, что указывает на ее сильное оплавление и остекловывание.

В составе В4, содержащем 1 мас. %  $\text{NaF}$  и 4 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , структура поверхности существенно меняется. На поверхности межпоровых стенок появляется тонкая коричневая пленка, представленная, вероятно, железистой фазой. Ее формирование обусловлено пониженной вязкостью материала, обеспечивающей миграцию ионов железа к поверхности образца. При этом внутренняя часть межпоровых стенок все так же остается темно-серой. В составе В5 (5 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) тенденция к расслоению поверхности сохраняется, и к ней добавляется «смятие» поверхности пор. Это указывает на значительное снижение вязкости, вследствие чего под давлением газов в образце происходит деформация пор и начинается оседание пены под собственным весом.

Для исследования изменений фазового состава проведен рентгенофазовый анализ составов, содержащих  $\text{NaF}$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  и их смесь (составы В0, В3, В5), его результаты показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что  $\text{NaF}$  и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  оказывают принципиально разное воздействие на фазовый состав материалов. Известно, что исследуемый шлак преимущественно представлен рентгеноаморфной стеклофазой, а основной кристаллической фазой является магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [21]. Введение в качестве плавня 5 мас. %  $\text{NaF}$  (состав В0) способствует частичной кристаллизации материала с формированием кристаллов альбита  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . Это согласуется с известными данными о повышении закристаллизованности стекла при введении фторидов [26–28]. Также формируется небольшое количество кристаллов муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . Повышение содержания буры в смеси плавней до 3 мас. % (состав В3) ведет к значительному снижению интенсивности кристаллических пиков. Фаза альбита полностью исчезает, что объясняется ее плавлением и переходом в стеклофазу. Основными фазами в данном составе являются  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , интенсивность которого возрастает. Также наблюдается небольшое количество кристаллов  $\text{SiO}_2$ . В составе, содержащем только 5 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (состав В5), наличие кристаллов продолжает снижаться, качественный состав фаз при этом остается тем же. Присутствие в качестве основной фазы оксида железа подтверждает предположение о формировании на поверхности пор железосодержащего слоя, ведущего к изменению его цвета при пониженной вязкости.



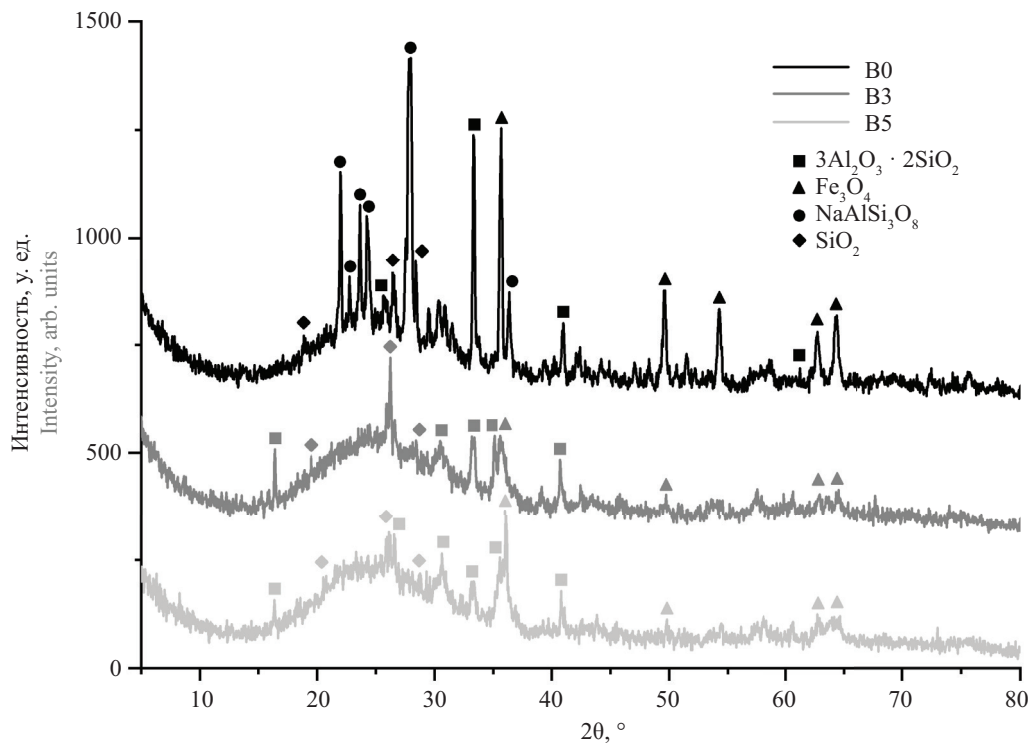


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа образцов  
Fig. 4. Results of XRD analysis of the specimens

Кроме того, структура, представленная стекло-фазой с распределенными в ней микрокристаллами (особенно муллита и  $\text{SiO}_2$ ), существенно повышает прочность материала, что является несомненным преимуществом. Это предположение полностью соответствует известным научным и производственным сведениям. К примеру, для повышения прочности керамзита применяется как изотермическая выдержка в период кристаллизации расплава, так и введение катализаторов кристаллизации ( $\text{FeS}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.). При лабораторном синтезе стеклокристаллических пен на основе различных отходов промышленности также наблюдается увеличение прочности при повышении содержания кристаллической фазы [29, 30].

Для исследования структурных превращений в процессе обжига была проведена инфракрасная спектроскопия (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что все исследованные образцы имеют основной широкий профиль в области  $850\text{--}1300\text{ см}^{-1}$  с пиком  $990\text{ см}^{-1}$ , что соответствует внутренним колебаниям кремний-кислородного каркаса. У всех образцов наблюдаются пики  $710, 720, 845\text{ см}^{-1}$  и дублет при  $780\text{--}800\text{ см}^{-1}$ , соответствующие симметричным деформационным колебаниям Si-O-Si, а также  $983\text{ см}^{-1}$ , соответствующие асимметричным деформационным колебаниям Si-O-Si. Профиль состава B0 содержит более выраженные пики при  $845\text{ см}^{-1}$  и дублет  $780\text{--}800\text{ см}^{-1}$ , а также дополнительно имеет пики при  $1028, 1043\text{ и }1084\text{ см}^{-1}$ , характерные

для асимметричного деформационного колебания Si-O-Si [31].

Сглаживание основного профиля при увеличении содержания буры указывает на формирование аморфной стеклофазы. Известно, что добавление оксида-модификатора сетки смещает пик в сторону меньших волновых чисел и уширяет его, что объясняется образованием тетраэдров  $[\text{SiO}_4]$  с большим количеством немостиковых атомов кислорода [32]. Это вызывает образование широкого пика при  $950\text{--}986\text{ см}^{-1}$ , соответствующего асимметричному растяжению Si-O-M. Данные результаты полностью согласуются

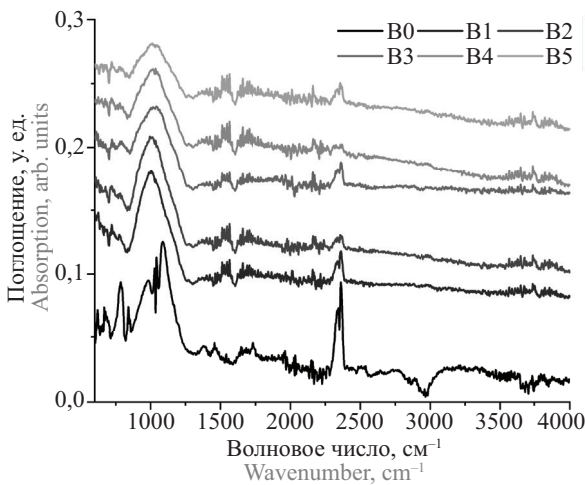


Рис. 5. Результаты инфракрасной спектроскопии образцов  
Fig. 5. Results of FTIR analysis of the specimens

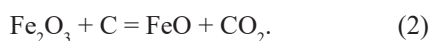


ся с результатами РФА, где со смещением соотношения плавней в сторону буры снижается интенсивность кристаллических пиков, т.е. происходит их переход в стеклообразное состояние.

Также все образцы имеют две «шумные» зоны в диапазоне  $1400\text{--}2300\text{ см}^{-1}$  и  $3600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ , соответствующие валентным ( $-\text{OH}$ ) и деформационным ( $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ ) колебаниям связанных молекул воды [32]. Дублетный пик при  $2343\text{--}2360\text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям  $\text{CO}_2$ . Наибольший размер этого пика для состава В0 можно объяснить тем, что во время спекания и частичного плавления частиц образующиеся вспенивающие газы капсулируются в микропорах образца. Увеличение содержания буры повышает степень плавления материала, облегчая улетучивание  $\text{CO}_2$  и снижая интенсивность соответствующего пика.

Полученные результаты дают возможность провести следующую параллель. Предлагаемая методика синтеза пористых материалов на основе золошлаковых отходов (ЗШО) по технологии «самовспенивания» близка к технологии производства керамзита. Для его производства используют легкоплавкие глинистые породы, обладающие склонностью к вспучиванию при быстром обжиге. Требования к химическому составу таких глин обычно следующие, %:  $\text{SiO}_2$  — 50–65,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 10–25,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$  — 3,5–10,  $\text{CaO} + \text{MgO}$  — до 7,  $\text{R}_2\text{O}$  — 3,5–5. Также нормируется содержание тонкодисперсных органических примесей и свободного кремнезема. Из полученных авторами ранее результатов [21] видно, что склонность различных видов золошлаков к вспениванию зависит от фазового состава (содержания аморфной фазы). Однако, сопоставляя требования для вспенивания ЗШО, видно, что актуальны и ограничения по химическому составу сырья, поскольку наихудшее вспенивание демонстрировали составы на основе золы-уноса, а наилучшие — шлака, вследствие чего он и был выбран оптимальным сырьем.

Механизм газовой выделения так же, как и для керамзита, основан на взаимодействии  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с углеродом и продуктами неполного сгорания с образованием газообразной фазы и  $\text{FeO}$ . Визуальным свидетельством этому служит изменение цвета образцов при вспенивании. Невспененные образцы обладают кирпично-коричневым цветом, что характеризует наличие железа в виде  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Формирование пор сопровождается изменением цвета на темно-серый, что характеризует железо в форме  $\text{FeO}$ . Следовательно, газовой выделения можно схематично описать уравнением:



Это также объясняет появление коричневых пленок в образцах с преобладанием буры при высоких температурах. Пониженная вязкость расплава обеспечивает миграцию газов — продукты окисления углерода покидают образец, что ведет к оседанию пены, а окружающий воздух проникает в поровое простран-

ство, что вызывает повторное окисление железа на поверхности и изменение ее цвета. Этим также объясняется и наличие железа в виде фазы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , а не  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , поскольку часть железа выступила в качестве восстановителя в реакции газообразования.

Процесс вспенивания протекает за счет совмещения процесса размягчения силикатной массы с процессами газовой выделения внутри материала. При этом происходит образование закрытых пор за счет формирования газообразных продуктов взаимодействия углерода и оксида железа, а также их роста из-за повышения давления газов. Единственным существенным различием является фазовый состав исходного сырья и синтезируемого материала. Для керамзита — это поликристаллическая структура, для шлака — рентгеноаморфная стеклообразная структура. Такое различие обеспечивает более легкое размягчение шлака и повышенную интенсивность взаимодействия его с углеродным компонентом.

Синтезированные материалы, по мнению авторов, служат перспективным аналогом керамзита и керамзитоподобных изделий. Процессы и температурный режим вспенивания, а также свойства образцов не уступают керамзитовым материалам. В то же время основное сырье для их производства (более 95 мас. %) — крупнотоннажные промышленные отходы. Их использование одновременно позволит снизить экологическую нагрузку за счет их рециклинга и сохранить природные глинистые ресурсы. Перспективным развитием данной темы может быть поиск способов интенсификации вспенивания других видов золошлаковых материалов, особенно золошлаковой смеси, поскольку повышенное содержание кристаллической золы существенно ухудшает вспенивающую активность. Возможно предположить, что это может быть достигнуто механохимической активацией или модернизацией состава флюсующей смеси, что требует тщательного изучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования изучена возможность интенсификации вспенивания шлаковых отходов ТЭС путем введения смеси плавней, состоящей из тетрабората натрия ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) и фторида натрия ( $\text{NaF}$ ). Установлено, что их совместное применение позволяет регулировать температурный режим спекания и вспенивания, обеспечивая формирование пористой структуры материала. Результаты экспериментов показали, что повышение температуры обжига приводит к последовательным стадиям спекания, размягчения и вспенивания материала. При этом введение буры  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  способствует плавному снижению вязкости и равномерному вспениванию, тогда как  $\text{NaF}$  демонстрирует резкий флюсующий эффект на поздних стадиях термообработки. Оптимальным составом оказался вариант с преобладанием буры (4 мас. %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 1 мас. %

NaF), обеспечивающий наименьшую плотность материала ( $378 \text{ кг/м}^3$ ) при обжиге при  $1200^\circ\text{C}$ . Микроструктурный анализ подтвердил, что увеличение доли  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  способствует формированию более равномерной пористой структуры с гладкими межпоровыми стенками, тогда как избыток NaF приводит к излишнему снижению вязкости и разрушению структуры. Рентгенофазовый анализ показал, что введение фторида натрия содействует кристаллизации альбита, тогда как тетраборат натрия увеличивает долю стеклофазы. Инфракрасная спектроскопия выявила соответствующие изменения в структуре алюмосиликатного каркаса.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности предлагаемого метода утилизации золошлаковых отходов ТЭС для получения пористых строительных материалов по технологии «самовспенивания». Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку, но и открывает новые возможности для производства теплоизоляционных и легких конструкционных материалов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава флюсующей смеси и изучение способов дополнительной активации других видов золошлаковых материалов для улучшения технологических характеристик синтезируемых материалов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nicolás M.F., Chávez M.M., Vlasova M., Pi Puig T. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand // *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2024. Vol. 63. Issue 5. Pp. 377–388. DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003
2. Chen G., Gao J., Liu C., Li S., Zhao Y., Wu H. et al. Effect of waste clay brick powder and slag on mechanical properties and durability of concrete // *Powder Technology*. 2025. Vol. 453. P. 120623. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120623
3. Dadouch M., Belal T., Ghembaza M.S. Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete — Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 411. P. 134436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134436
4. Ma Z., Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Wang C. Re-using waste glass fines to substitute cement and sand for recycled ultra-high performance strain-hardening cementitious composites (UHP-SHCC) // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 455. P. 139186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139186
5. Рыщенко М.И., Федоренко Е.Ю., Лисачук Г.В., Шабанова Г.Н. Техногенные материалы и промышленные отходы как источник сырья для производства строительных материалов // *Экология и промышленность*. 2013. № 4 (37). С. 10–16. EDN IEUQQH.
6. Жуков Д.Ю., Аверина Ю.М., Ветрова М.А. Технологический рециклинг отходов переработки обедненных марганцевых руд // *Успехи в химии и химической технологии*. 2018. Т. 32. № 1 (197). С. 64–67. EDN YVRACV.
7. Корнеева Е.В. Техногенные шламовые отходы промышленности в производстве строительных материалов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 10 (790). С. 99–111. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-99-111. EDN RBKRWN.
8. Ashimova A.A., Bek A.A., Nurlybaev R.Ye., Nurpeisova M.B. Processing of ash and slag waste from thermal power plants with production of building materials // *Молодой ученый*. 2024. № S48–1 (547–1). С. 18–21. EDN TLMCIG.
9. Hossiney N., Das P., Mohan M.K., George J. In-plant production of bricks containing waste foundry sand — a study with Belgaum foundry industry // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 9. P. e00170. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00170
10. Hafez A.I., Khedr M.M.A., Osman R.M., Sabry R., Mohammed M.S. A comparative investigation of the unit cost for the preparation of modified sand and clay bricks from rice husk waste // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101765. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101765
11. Wang P., Li J., Hu Y., Cheng H. Solidification and stabilization of Pb–Zn mine tailing with municipal solid waste incineration fly ash and ground granulated blast-furnace slag for unfired brick fabrication // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 321. P. 121135. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121135
12. Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y. The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ , carbon and CRT panel glass // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 2. Pp. 2839–2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138
13. Smiljanić S., Hribar U., Spreitzer M., König J. Influence of additives on the crystallization and thermal conductivity of container glass cullet for foamed glass preparation // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 23. Pp. 32867–32873. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.08.183
14. Zhou H., Feng K., Liu Y., Cai L. Preparation and characterization of foamed glass-ceramics based on waste glass and slow-cooled high-titanium blast furnace slag using borax as a flux agent // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022. Vol. 590. P. 121703. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121703

15. Niu Y.H., Fan X.-Y., Ren D., Wang W., Li Y., Yang Z. *et al.* Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  content on thermal properties of foam-glass ceramics prepared from smelting slag // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. P. 123610. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123610
16. Karamanov A., Hamzawy E.M.A., Karamanova E., Jordanov N.B., Darwish H. Sintered glass-ceramics and foams by metallurgical slag with addition of  $\text{CaF}_2$  // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Issue 5. Pp. 6507–6516. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.132
17. Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Сударева С.В. Методы обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭС и пути их вовлечения в хозяйственный оборот : обзор // *Теплоэнергетика*. 2019. № 3. С. 3–24. DOI: 10.1134/S0040363619030056. EDN YVCLLV.
18. Hu S., Li D., Li Y., Guo Q., Tian D., Zhang L. *et al.* Preparation of Foamed Ceramics from Graphite Tailings Using a Self-Foaming Method // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Issue 521. DOI: 10.3390/min13040521
19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Ermakov A.A. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 8 (100). DOI: 10.18720/MCE.100.6. EDN GPPAGD.
20. Qi Y., Yue Q., Han S., Yue M., Gao B., Yu H. *et al.* Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 176. Issue 1–3. Pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.001
21. Гольцман Б.М., Смолий В.А., Яценко В.С., Вильбицкая Е.А. Синтез пористых материалов на основе золошлаковых отходов ТЭС по технологии «самовспенивания» // *Стекло и керамика*. 2025. Т. 98. № 1 (1165). С. 50–57. DOI: 10.14489/glc.2025.01.pp.050-057. EDN EKTPTZ.
22. Сенина М.О., Лемешев Д.О., Протасов А.С., Жуков Д.Ю. Исследование влияния добавки фторида лития на свойства плотной керамики из алюмомагнезиевой шпинели, полученной спеканием без давления // *Цветные металлы*. 2022. № 9. С. 18–22. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.02. EDN FGPDQW.
23. Wang Z., Huang S., Yu Y., Wen G., Tang P., Hou Z. Comprehensive understanding of the microstructure and volatilization mechanism of fluorine in silicate melt // *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 243. P. 116773. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116773
24. Mohan S.K., Sarkar R. A comparative study on the effect of different additives on the formation and densification of magnesium aluminate spinel // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Issue 12. Pp. 13932–13943. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.05.206
25. Гольцман Б.М., Яценко Е.А., Яценко Л.А., Ирха В.А. Синтез пористых силикатных материалов при использовании фторида натрия в качестве флюсующей добавки // *Цветные металлы*. 2021. № 6. С. 44–49. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.06. EDN CUCCFS.
26. Manjunatha C., Nagabhushana B.M., Sunita D.V., Nagabhushana H., Sharma S.C., Venkatesh G.B. *et al.* Effect of  $\text{NaF}$  flux on microstructure and thermoluminescence properties of  $\text{Sm}^{3+}$  doped  $\text{CdSiO}_3$  nanophosphor // *Journal of Luminescence*. 2013. Vol. 134. Pp. 432–440. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.08.006
27. Ge Z., Xiong B., Zhang X., Yuan X. Effect of photo-thermo-induced nucleation on crystallization properties of  $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO--Na}_2\text{O}$  photo-thermo-refractive glass // *Optical Materials*. 2022. Vol. 132. Issue 4. P. 112878. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112878
28. Kolobkova E., Alkhlef A., Dinh B., Yasukevich A., Dernovich O., Kuleshov N. *et al.* Spectral properties of  $\text{Nd}^{3+}$  ions in the new fluoride glasses with small additives of the phosphates // *Journal of Luminescence*. 2019. Vol. 206. Pp. 523–529. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.10.082
29. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Методологические принципы синтеза пеностеклокристаллических материалов по низкотемпературной технологии // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 41–45. EDN SJVXNP.
30. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Физико-химическое моделирование состава пеностеклокристаллических материалов // *Физика и химия стекла*. 2015. Т. 41. № 1. С. 166–172. EDN TKAZFZ.
31. Mohassab Y., Sohn H.Y. Analysis of slag chemistry by FTIR-RAS and Raman spectroscopy: Effect of water vapor content in  $\text{H}_2\text{O/CO/CO}_2$  mixtures relevant to a novel green ironmaking technology // *Steel Research International*. 2015. Vol. 86. Issue 7. Pp. 740–752. DOI: 10.1002/srin.201400186
32. Finocchiaro C., Barone G., Mazzoleni P., Leonelli C., Gharzouni A., Rossignol S. FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. P. 120095. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120095

Поступила в редакцию 3 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 9 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 29 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Борис Михайлович Гольцман** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 711009, Scopus: 57144398600, ResearcherID: A-2765-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; b.goltsman@npi-tu.ru;



**Елена Альфредовна Яценко** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 490400, Scopus: 7003335636, ResearcherID: A-3367-2014, ORCID: 0000-0003-2242-1765; e\_yatsenko@mail.ru;

**Анна Александровна Тимофеева** — аспирант кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; Scopus: 58955788000; anna.dirina@mail.ru;

**Полина Александровна Скубовская** — студент магистратуры; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; polina.gladkova.02@mail.ru;

**Виктория Александровна Смолий** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 588275, Scopus: 52063721000, ResearcherID: A-3442-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; vikk-toria@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гольцман Б.М. — идея и концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Яценко Е.А. — методология исследования, научное руководство и консультирование, итоговые выводы.

Тимофеева А.А. — проведение физико-химических исследований (ИК, РФА), написание исходного текста.

Скубовская П.А. — выполнение лабораторных исследований (синтез образцов, исследование свойств).

Смолий В.А. — исследование грубой и тонкой структуры образцов, обработка материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Nicolás M.F., Chávez M.M., Vlasova M., Pi Puig T. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2024; 63(5):377-388. DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003
2. Chen G., Gao J., Liu C., Li S., Zhao Y., Wu H. et al. Effect of waste clay brick powder and slag on mechanical properties and durability of concrete. *Powder Technology*. 2025; 453:120623. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120623
3. Dadouch M., Belal T., Ghembaza M.S. Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete — Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134436
4. Ma Z., Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Wang C. Re-using waste glass fines to substitute cement and sand for recycled ultra-high performance strain-hardening cementitious composites (UHP-SHCC). *Construction and Building Materials*. 2024; 455:139186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139186
5. Ryschenko M.I., Fedorenko E.Yu., Lisachuk G.V., Shabanova G.N. Technogenic materials and industrial waste as a source of raw stock for producing building materials. *Ecology and Industry*. 2013; 4(37):10-16. EDN IEUQQH. (rus.).
6. Zhukov D.Yu., Averina Yu.M., Vetrova M.A. Technological recycling of waste manufacturing different manganese ore. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2018; 32(1):(197):64-67. EDN YVRACV. (rus.).
7. Korneeva E.V. Man-made sludge waste industrial in the production of construction materials. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 10(790):99-111. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-99-111. EDN RBKRWN. (rus.).
8. Ashimova A.A., Bek A.A., Nurlybaev R.Ye., Nurpeisova M.B. Processing of ash and slag waste from thermal power plants with production of building materials. *Young Scientist*. 2024; S48-1(547-1):18-21. EDN TLMCIG.
9. Hossiney N., Das P., Mohan M.K., George J. In-plant production of bricks containing waste foundry sand — a study with Belgaum foundry industry. *Case Studies in Construction Materials*. 2018; 9:e00170. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00170
10. Hafez A.I., Khedr M.M.A., Osman R.M., Sabry R., Mohammed M.S. A comparative investigation of the unit cost for the preparation of modified sand and clay bricks from rice husk waste. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101765. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101765
11. Wang P., Li J., Hu Y., Cheng H. Solidification and stabilization of Pb-Zn mine tailing with municipal solid waste incineration fly ash and ground granulated blast-furnace slag for unfired brick fabrication. *Envi-*



*ronmental Pollution*. 2023; 321:121135. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121135

12. Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y. The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of  $Mn_3O_4$ , carbon and CRT panel glass. *Ceramics International*. 2021; 47(2):2839-2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138

13. Smiljanić S., Hribar U., Spreitzer M., König J. Influence of additives on the crystallization and thermal conductivity of container glass cullet for foamed glass preparation. *Ceramics International*. 2021; 47(23):32867-32873. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.08.183

14. Zhou H., Feng K., Liu Y., Cai L. Preparation and characterization of foamed glass-ceramics based on waste glass and slow-cooled high-titanium blast furnace slag using borax as a flux agent. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022; 590:121703. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121703

15. Niu Y.H., Fan X.-Y., Ren D., Wang W., Li Y., Yang Z. et al. Effect of  $Na_2CO_3$  content on thermal properties of foam-glass ceramics prepared from smelting slag. *Materials Chemistry and Physics*. 2020; 256:123610. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123610

16. Karamanov A., Hamzawy E.M.A., Karamanova E., Jordanov N.B., Darwish H. Sintered glass-ceramics and foams by metallurgical slag with addition of  $CaF_2$ . *Ceramics International*. 2020; 46(5):6507-6516. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.132

17. Ryabov Y.V., Delitsyn L.M., Ezhova N.N., Sudareva S.V. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use : a review. *Thermal Engineering*. 2019; 3:3-24. DOI: 10.1134/S0040363619030056. EDN YVCLLV. (rus.).

18. Hu S., Li D., Li Y., Guo Q., Tian D., Zhang L. et al. Preparation of Foamed Ceramics from Graphite Tailings Using a Self-Foaming Method. *Minerals*. 2023; 13(521). DOI: 10.3390/min13040521

19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Ermakov A.A. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 8(100). DOI: 10.18720/MCE.100.6. EDN GPPAGD.

20. Qi Y., Yue Q., Han S., Yue M., Gao B., Yu H. et al. Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 176(1-3):76-84. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.001

21. Gol'tsman B. M., Smoliy V.A., Yatsenko V.S., Vilbitskaya E.A. Synthesis of porous materials based on tpp ash-slag waste using "self-foaming" technology. *Glass and Ceramics*. 2025; 98(1):(1165):50-57. DOI: 10.14489/glc.2025.01.pp.050-057. EDN EKTPTZ. (rus.).

22. Senina M.O., Lemeshev D.O., Protasov A.S., Zhukov D.Yu. Understanding the effect of lithium fluo-

ride additive on the properties of pressureless sintered magnesium aluminate spinel ceramics. *Tsvetnye Metally*. 2022; 9:18-22. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.02. EDN FGPDQW. (rus.).

23. Wang Z., Huang S., Yu Y., Wen G., Tang P., Hou Z. Comprehensive understanding of the microstructure and volatilization mechanism of fluorine in silicate melt. *Chemical Engineering Science*. 2021; 243:116773. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116773

24. Mohan S.K., Sarkar R. A comparative study on the effect of different additives on the formation and densification of magnesium aluminate spinel. *Ceramics International*. 2016; 42(12):13932-13943. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.05.206

25. Goltsman B.M., Yatsenko E.A., Yatsenko L.A., Irkha V.A. Synthesis of porous silicate materials using sodium fluoride as fluxing agent. *Tsvetnye Metally*. 2021; 6:44-49. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.06. EDN CUCCFS. (rus.).

26. Manjunatha C., Nagabhushana B.M., Sunita D.V., Nagabhushana H., Sharma S.C., Venkatesh G.B. et al. Effect of NaF flux on microstructure and thermoluminescence properties of  $Sm^{3+}$  doped  $CdSiO_3$  nanoporphor. *Journal of Luminescence*. 2013; 134:432-440. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.08.006

27. Ge Z., Xiong B., Zhang X., Yuan X. Effect of photo-thermo-induced nucleation on crystallization properties of  $SiO_2-Al_2O_3-ZnO-Na_2O$  photo-thermorefractive glass. *Optical Materials*. 2022; 132(4):112878. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112878

28. Kolobkova E., Alkhlef A., Dinh B., Yasukevich A., Dernovich O., Kuleshov N. et al. Spectral properties of  $Nd^{3+}$  ions in the new fluoride glasses with small additives of the phosphates. *Journal of Luminescence*. 2019; 206:523-529. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.10.082

29. Kaz'mina O. V., Vereshchagin V.I. Methodological principles of synthesis of foam glass-crystalline materials using low-temperature technology. *Construction Materials*. 2014; 8:41-45. EDN SJVXNP. (rus.).

30. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I. Physicochemical modeling of composition of foam glass-crystal materials. *Glass Physics and Chemistry*. 2015; 41(1):166-172. EDN TKAZFZ. (rus.).

31. Mohassab Y., Sohn H.Y. Analysis of slag chemistry by FTIR-RAS and Raman spectroscopy: Effect of water vapor content in  $H_2O/CO/CO_2$  mixtures relevant to a novel green ironmaking technology. *Steel Research International*. 2015; 86(7):740-752. DOI: 10.1002/srin.201400186

32. Finocchiaro C., Barone G., Mazzoleni P., Leonelli C., Gharzouni A., Rossignol S. FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions. *Construction and Building Materials*. 2020; 262:120095. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120095

Received March 3, 2025.

Adopted in revised form on March 9, 2025.

Approved for publication on May 29, 2025.

**B I O N O T E S:** **Boris M. Goltsman** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 711009, Scopus: 57144398600, ResearcherID: A-2765-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; b.goltsman@npi-tu.ru;

**Elena A. Yatsenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 490400, Scopus: 7003335636, ResearcherID: A-3367-2014, ORCID: 0000-0003-2242-1765; e\_yatsenko@mail.ru;

**Anna A. Timofeeva** — postgraduate student of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; Scopus: 58955788000; anna.dirina@mail.ru;

**Polina A. Skubovskaya** — master's student; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; polina.gladkova.02@mail.ru;

**Victoria A. Smoliy** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 588275, Scopus: 52063721000, ResearcherID: A-3442-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; vikk-toria@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Boris M. Goltsman — idea and concept of the study, text revision, final conclusions.*

*Elena A. Yatsenko — research methodology, scientific supervision and consulting, final conclusions.*

*Anna A. Timofeeva — performing physicochemical studies (IR, XRD), writing the original text.*

*Polina A. Skubovskaya — performing laboratory studies (sample synthesis, property study).*

*Victoria A. Smoliy — study of samples structure (microscopy), material processing.*

*Authors declare no potential conflict of interest.*

## Анализ влияния циклического нагружения на осадку глинистого основания резервуара

Евгения Николаевна Акбулякова, Карина Алексеевна Казаринова,  
Екатерина Давыдовна Телепова

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Грунты в основании фундаментов резервуаров подвержены циклам нагружения и разгружения при наливе и опорожнении резервуара. Строительство таких сооружений зачастую ведется на участках, где залегают переувлажненные глинистые грунты. Цель исследования — изучить изменение вертикальных деформаций водонасыщенных глин под воздействием циклов «нагрузка – разгрузка». Это позволит выявить величины дополнительных осадок водонасыщенного глинистого основания при циклах нагружения и разгружения.

**Материалы и методы.** Выполнена серия лабораторных испытаний в одометре с циклами нагружения и разгружения с образцами глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции. Полученные при лабораторных испытаниях значения механических параметров исследуемых глин использованы в численных расчетах осадки основания вертикального стального резервуара в программном комплексе PLAXIS 2D.

**Результаты.** Изучено влияние консистенции глины на величину осадки при циклическом нагружении образцов в компрессионном приборе. Определено соотношение пластических и упругих деформаций для глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции. Дополнительная осадка глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции, вызванная циклическим нагружением и разгрузкой составляли 2,4–4,1 % от общей осадки. составила до 10 % от общей осадки грунта. По результатам численных экспериментов выявлено, что дополнительные осадки основания резервуара при 20 циклах нагружения и разгрузки составляли 2,4–4,1 % от общей осадки.

**Выводы.** Проведенные лабораторные и численные исследования показали, что циклы нагружения и разгружения водонасыщенных глин приводят к развитию дополнительных осадок. Величина дополнительной осадки зависит от количества циклов и консистенции глины. За все время эксплуатации резервуара число циклов налива и опорожнения может составлять более 2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных деформаций грунта в основании фундамента.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** глина, упругие деформации, пластические деформации, одометр, PLAXIS 2D, стальной вертикальный резервуар, осадка

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Акбулякова Е.Н., Казаринова К.А., Телепова Е.Д. Анализ влияния циклического нагружения на осадку глинистого основания резервуара // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1211–1220. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1211-1220

*Автор, ответственный за переписку:* Евгения Николаевна Акбулякова, aspirant123@mail.ru.

## Analysis of the influence of cyclic loading on the settlement of clay base of tank

Evgeniya N. Akbulyakova, Karina A. Kazarinova, Ekaterina D. Teleпова  
*Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The soils at the base of tank foundations are subject to loading and unloading cycles during tank filling and emptying. The construction of such constructions is often carried out in areas with overwatered clay soils. The purpose of the study is to investigate the change in vertical deformations of water-saturated clays under the influence of “loading – unloading” cycles. This will make it possible to identify the values of additional settlements of water-saturated clay subgrade under loading and unloading cycles.

**Materials and methods.** A series of laboratory tests was performed in an odometer with cycles of loading and unloading with specimens of firm, soft-firm and very soft clays. The values of mechanical parameters of the studied clays obtained during laboratory tests were used in numerical calculations of the settlement of the base of a vertical steel tank in the PLAXIS 2D software package.

**Results.** The influence of clay consistency on the value of settlement under cyclic loading of samples in a compression device was studied. The ratio of plastic and elastic deformations was determined for clays of firm, soft-firm and very soft consistency. Additional settlement of clays with firm, soft-firm and very soft consistency caused by cyclic loading and unload-

ing (within the first 10 cycles) amounted to 10 % of the total soil settlement. The results of numerical experiments showed that the additional settlement of the tank base at 20 cycles of loading and unloading amounted to 2.4–4.1 % of the total settlement.

**Conclusions.** Laboratory and numerical studies have shown that loading and unloading cycles of water-saturated clays lead to the development of additional settlement. The amount of additional settlement depends on the number of cycles and the consistency of the clay. During the whole period of the tank operation the number of filling and emptying cycles can be more than 2000, therefore, additional soil deformations in the foundation base should be expected.

**KEYWORDS:** clay, elastic deformations, plastic deformations, odometer, PLAXIS 2D, steel vertical tank, settlement

**FOR CITATION:** Akbulyakova E.N., Kazarinova K.A., Telepova E.D. Analysis of the influence of cyclic loading on the settlement of clay base of tank. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1211-1220. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1211-1220 (rus.).

*Corresponding author:* Evgeniya N. Akbulyakova, aspirant123@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные стальные цилиндрические резервуары, используемые для хранения нефти, относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности. Аварии на таких инженерных конструкциях представляют серьезную угрозу для окружающей среды и жизни людей. Поэтому при возведении стальных цилиндрических вертикальных резервуаров предъявляются высокие требования к расчетам оснований их фундаментов [1, 2]. При проектировании таких резервуаров важным аспектом является выбор надежного и устойчивого основания, особенно в сложных инженерно-геологических условиях, где часто встречаются водонасыщенные глинистые грунты мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции [1].

Циклическое нагружение и разгружение при наливе и опорожнении резервуаров, а также утечки из резервуара вызывают изменение свойств грунтов основания [2–5]. Это может существенно повлиять на устойчивость и эксплуатационные характеристики данных сооружений [6–10]. Среди главных причин аварийных ситуаций с резервуарами авторы трудов [11–14] выделяют: нарушение технологии строительно-монтажных работ, грубые ошибки на стадии изысканий и проектирования, наличие дефектов в материалах и конструкциях, неравномерную осадку основания. В публикациях [12–14] отмечено, что развитие неравномерных осадок водонасыщенного глинистого основания служит наиболее частой причиной аварий вертикальных стальных резервуаров. Учитывая большой объем стальных резервуаров, а также хранение опасных жидкостей, необходимо исследовать поведение резервуаров в различных грунтовых условиях и с учетом их циклического нагружения и разгружения [15–20]. Использование современных методик и программных комплексов (ПК) для геотехнических расчетов позволяет более точно оценить долгосрочные последствия циклического нагружения, что способствует повышению безопасности и эффективности эксплуатации стальных цилиндрических вертикальных резервуаров [18–21]. Поэтому обеспечение безаварийной эксплуатации резервуаров в сложных инженерно-геологических

условиях — актуальная задача геотехники территорий.

Цель исследования — анализ влияния циклов «нагружение – разгружение» на осадку основания резервуара, представленного глинами трех консистенций: мягкопластичной, текучепластичной, текучей.

Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

1. Выполнены компрессионные испытания с циклами «нагружение – разгружение» для образцов глин трех консистенций: мягкопластичной, текучепластичной, текучей.
2. Полученные компрессионные кривые использованы для калибровки параметров численной модели Soft Soil для исследуемых глин мягкопластичной, текучепластичной, текучей консистенции.
3. Выполнены численные расчеты осадки резервуара для трех случаев глинистого основания (глина мягкопластичная, глина текучепластичная, глина текучая).
4. Проанализированы результаты лабораторных испытаний и численных расчетов, сформулированы выводы по работе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью лабораторного исследования была выбрана аллювиальная глина четвертичного возраста, отобранная на одной из строительных площадок в г. Перми. Для испытываемых образцов глины заданы значения влажности, соответствующие трем консистенциям — мягкопластичной, текучепластичной, текучей. Далее проведен комплекс лабораторных испытаний для установления физических и механических характеристик глины. Значения некоторых характеристик исследуемых глин представлены в табл. 1.

Для определения упругих и пластических свойств грунта выполнено три серии испытаний в компрессионном приборе для трех разных консистенций исследуемой глины: мягкопластичной, текучепластичной, текучей. В каждой серии испытания осуществлены с тремя образцами-близнецами. Компрессионные испытания включали 10 циклов «нагрузка – разгрузка» для каждого образца.



Табл. 1. Значения характеристик исследуемых грунтов

Table 1. Values of characteristics of the investigated soils

Параметр Parameter	Средние значения параметров для трех типов глин Average values of parameters for three types of clays		
	Мягкопластичная глина Firm clay	Текучепластичная глина Soft-firm clay	Текучая глина Very soft clay
Удельный вес, кН/м³ Specific weight, kN/m³	20,2	19,2	18,5
Модуль Юнга, МПа Young modulus, MPa	26,0	23,0	20,0
Удельное сцепление, кН/м² Cohesion intercept, kN/m²	43,0	38,5	34,5
Угол внутреннего трения, ° Angle of internal friction, °	14,5	13,0	11,0

Полученные при лабораторных испытаниях значения параметров физических и механических характеристик глин использованы для численных экспериментов в ПК PLAXIS 2D. В качестве объекта исследования выбран вертикальный стальной резервуар. Объем резервуара составляет 3 тыс. м³, внутренний диаметр — 18,98 м, высота — 12 м. Эксплуатационная нагрузка на дно резервуара равна 133 кПа. Под стенкой резервуара расположен монолитный кольцевой железобетонный фундамент. Под фундаментом резервуара находится подушка из щебня, ниже располагается глина. Расчет осадки основания резервуара выполнен для трех типов глин в основании фундамента: мягкопластичной, текучепластичной, текучей. На рис. 1 приведена расчетная схема основания резервуара в ПК PLAXIS 2D.

С целью проведения численных расчетов для исследуемых мягкопластичных, текучепластичных и текучих глин была использована модель Soft Soil, которая позволяет учитывать нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями. Среди недостатков данной модели можно отметить завышение области упругого поведения грунта и, как следствие, недостаточную точность при модели-

ровании циклического нагружения. Для повышения точности численных экспериментов авторы предварительно откалибровали параметры модели Soft Soil в модуле Soil Test с применением выполненных компрессионных испытаний. Калибровка производилась путем последовательного подбора значений коэффициента компрессии и коэффициента декомпрессии для максимального приближения модельной компрессионной кривой к опытной компрессионной кривой. Полученные значения коэффициента компрессии и коэффициента декомпрессии приведены в табл. 2.

Далее выполнены три серии численных экспериментов для моделирования работы трех типов основания резервуара: глины мягкопластичной, глины текучепластичной, глины текучей. Для численного моделирования работы основания фундамента при наливе и опорожнении резервуара в расчетах были заданы 20 циклов нагружения и разгружения основания. Полученные результаты дали возможность сформулировать выводы о влиянии консистенции глин и количества циклов нагружения на величину вертикальных деформаций основания резервуара.

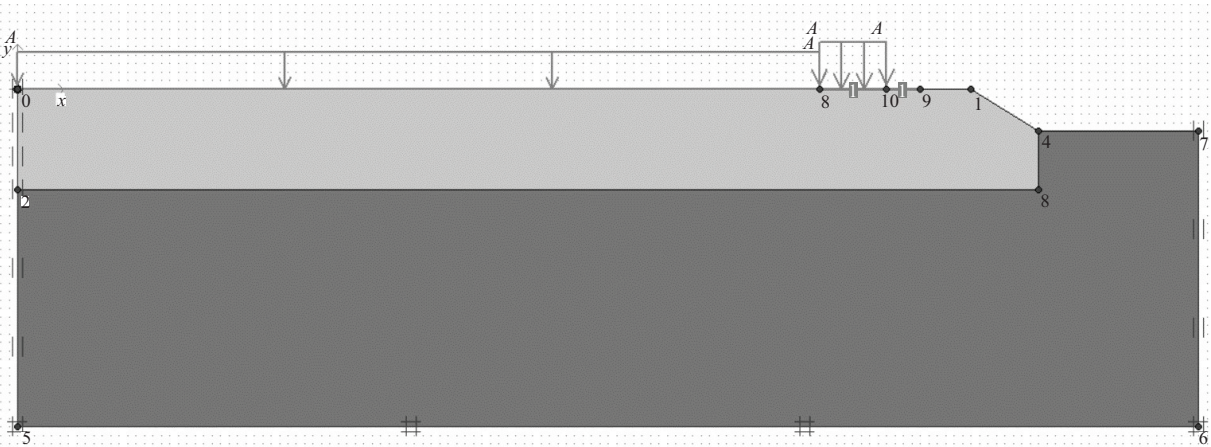


Рис. 1. Расчетная схема основания резервуара

Fig. 1. Calculation scheme of the tank base

Табл. 2. Значения коэффициентов компрессии и декомпрессии  
Table 2. Values of compression and decompression ratio

Параметр Parameter	Тип грунта Soil type		
	Мягкопластичная глина Firm clay	Текучепластичная глина Soft-firm clay	Текучая глина Very soft clay
Коэффициент компрессии $\lambda$ Compression ratio $\lambda$	0,031	0,060	0,089
Коэффициент декомпрессии $k$ Decompression ratio $k$	0,009	0,015	0,015

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам компрессионных испытаний с циклическим нагружением и разгрузением образцов грунта получены вертикальные деформации для трех исследуемых консистенций глины (рис. 2).

Анализ компрессионных испытаний глин позволил сформулировать следующие выводы:

1. Доля пластических деформаций глины для первичного нагружения и разгрузки составляла 79–93 %. Максимальные значения пластических деформаций были зафиксированы для образцов текучей глины, минимальные — для глины мягкопластичной. Доля упругих деформаций при первичной нагрузке и разгрузке составляла 7–21 %. При последующих циклах нагружения и разгрузки доля пластических деформаций снижалась, начинали преобладать упругие деформации. После 7–9 циклов нагружения и разгрузки образцы исследуемых глин начинали деформироваться только упруго.

2. Дополнительные вертикальные деформации глины, вызванные циклическим нагружением и разгрузением (в пределах рассматриваемых 10 циклов), составляли до 10 % от общей деформации образца грунта и возрастали с увеличением количества циклов.

3. При увеличении показателя текучести значения модуля упругости уменьшались и увеличивалась относительная вертикальная деформация образцов глины. Коэффициент корреляции для зависимости между нагрузкой и вертикальной деформацией образца составил 0,98.

На основании выполненных компрессионных испытаний образцов глин в одометре для расчета вертикальной деформации  $S_{oed}$  авторами получена экспоненциальная зависимость, имеющая вид:

$$S_{oed} = 0,4348 \cdot e^{2,0974 \cdot IL}, \tag{1}$$

где  $IL$  — показатель текучести грунта, д. ед.

Величина достоверности аппроксимации для данного уравнения составила 0,99.

По результатам численных расчетов основания вертикального резервуара в PLAXIS 2D получены изолинии перемещений грунтового основания для трех случаев — глина мягкопластичная (рис. 3, а), глина текучепластичная (рис. 3, b) и глина текучая (рис. 3, с).

Анализ рис. 3 показал, что вертикальные перемещения под центральной частью резервуара и под крайними участками отличаются. Максимальные значения

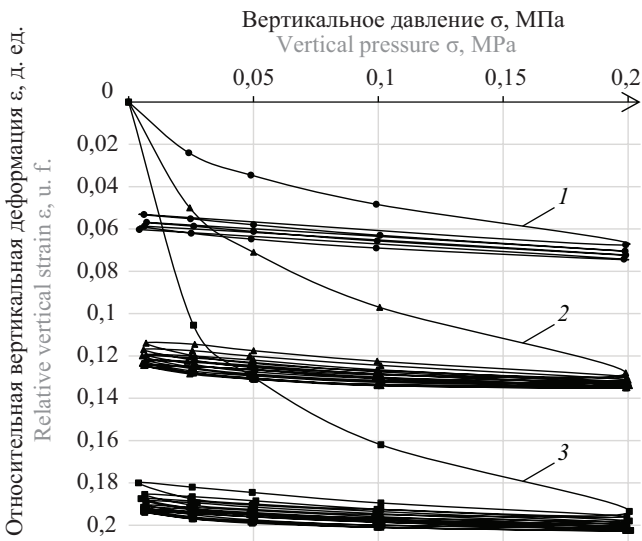


Рис. 2. Графики испытания глины методом компрессионного сжатия: 1 — мягкопластичная глина; 2 — текучепластичная глина; 3 — текучая глина

Fig. 2. Graphs of clay compression test: 1 — firm clay; 2 — soft-firm clay; 3 — very soft clay

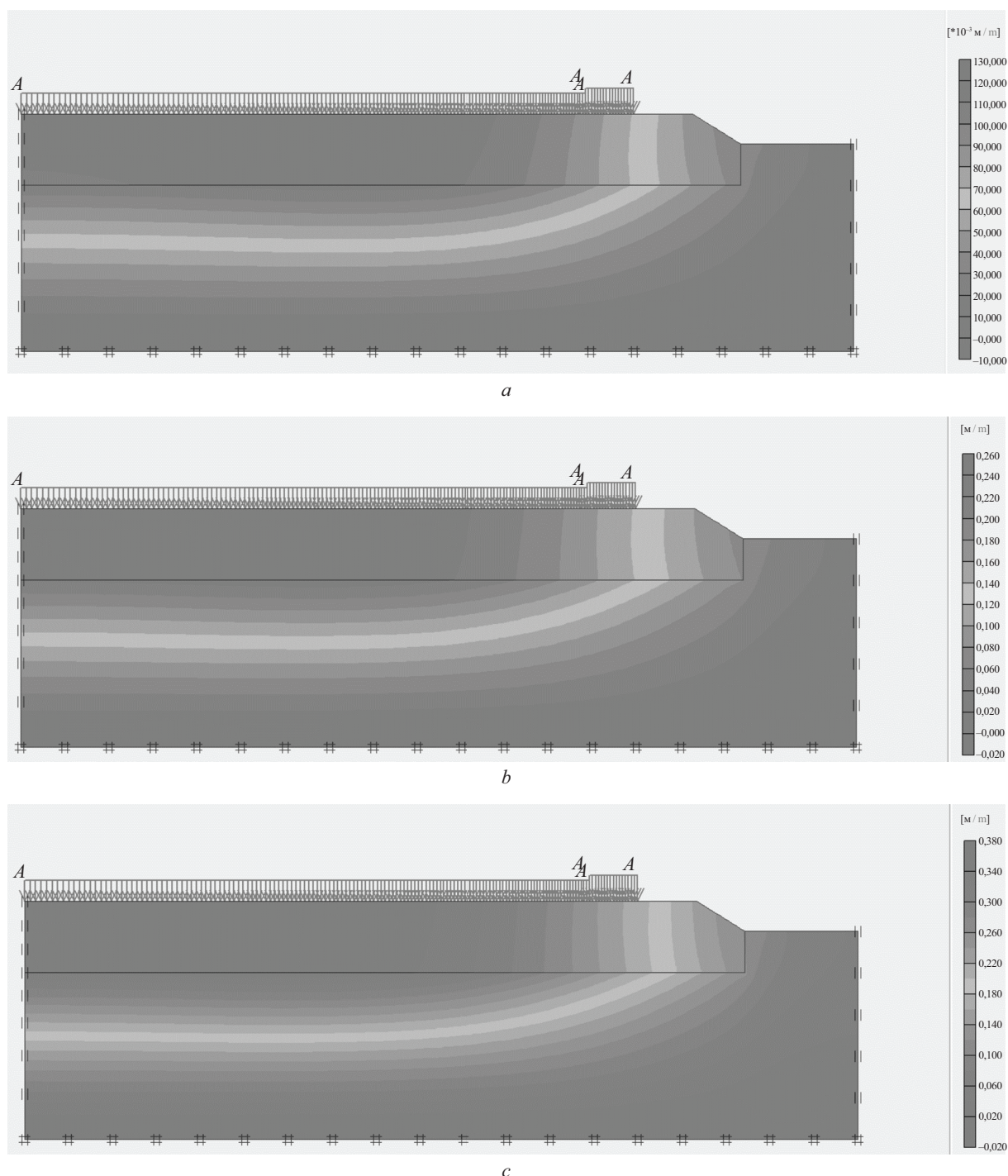


Рис. 3. Изолинии вертикальных перемещений: *a* — глина мягкопластичная; *b* — глина текучепластичная; *c* — глина текучая

Fig. 3. Isolines of vertical displacements: *a* — firm clay; *b* — soft-firm clay; *c* — very soft clay

осадки наблюдались под центральной частью дна резервуара и убывали к краевым зонам. Поэтому при наличии в основании фундамента резервуара мягкопластичных, текучепластичных и текучих глин может возникать разность осадок под центром резервуара и под его стенкой. Это будет являться причиной образования крена, смещения центра тяжести и неравномерного распределения нагрузки от давления хранимого продукта на фундамент, увеличения напря-

жений в стенке и в соединительных узлах, появления трещин в конструкциях.

Графики осадки для трех случаев основания резервуара — глина мягкопластичная, глина текучепластичная и глина текучая, полученные на основании численного моделирования циклов «нагружение — разгружение» резервуара, показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при первом цикле нагружения основания резервуара происходят основные



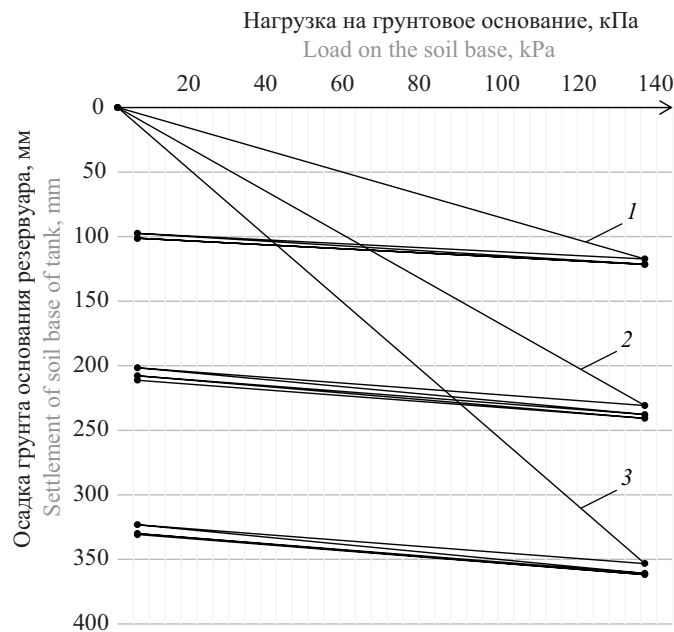


Рис. 4. Графики осадки основания резервуара при циклах «нагрузка – разгрузка»: 1 — мягкопластичная глина; 2 — текучепластичная глина; 3 — текучая глина

Fig. 4. Graphs of tank base settlement during loading – unloading cycles: 1 — firm clay; 2 — soft-firm clay; 3 — very soft clay

вертикальные деформации грунта, при последующих циклах «нагрузка – разгрузка» отмечается дополнительное приращение деформаций грунта. По результатам численных экспериментов получено, что на этапах разгрузки грунт в основании резервуара частично восстанавливает свои деформации, проявляя упругие свойства. Пластическая составляющая деформаций осадки основания резервуара для первичного нагружения и разгрузки составила 83–92 %, что хорошо согласуется с результатами лабораторных испытаний в компрессионном приборе.

По данным численных расчетов дополнительные осадки основания резервуара при 20 циклах нагружения и разгрузки составляли 2,4–4,1 % от общей осадки. Значения осадки возрастали с увеличением показателя текучести глины, коэффициент корреляции для данной зависимости — 0,98. После обработки результатов численных вычислений было получено выражение, аппроксимирующее зависимость осадки фундамента резервуара от показателя текучести глины:

$$S_{ss} = 31,654 \cdot e^{2,3056 \cdot IL}, \tag{2}$$

где  $IL$  — показатель текучести грунта, д. ед.

Величина достоверности аппроксимации уравнения (2) составила 0,99. Полученное уравнение позволяет выполнить предварительный расчет вертикальных деформаций основания фундамента, сложенного глинами со значением показателя текучести от 0,58 до 1,05, для резервуара объемом 3 тыс. м<sup>3</sup> с учетом 20 циклов налива и опорожнения.

За все время эксплуатации резервуара число циклов налива и опорожнения может составлять более

2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных вертикальных деформаций грунта. Максимальные значения расчетных осадок основания, сложенного мягкопластичными глинами, не превышали допустимых значений по ВСП 34-01-03. Для случаев текучепластичной и текучей глины полученные значения осадки превысили допустимые значения по ВСП 34-01-03. Это означает, что при наличии таких глин в основании резервуара необходимо предусматривать дополнительные технические решения, например армирование основания геосинтетическими материалами, замену слабого грунта (при неглубоком его залегании), увеличение мощности грунтовой подушки, усиление грунтов основания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

Доля пластических деформаций для первичного нагружения и разгрузки в компрессионном приборе составляла 79–93 %. Значения деформаций возрастали при увеличении показателя текучести глины. При повторном нагружении и разгрузении глины в компрессионном приборе доля пластических деформаций снижалась, начинали преобладать упругие деформации. После 7–9 циклов нагружения образцы глины мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции начинали деформироваться только упруго. Дополнительные осадки глины, вызванные циклическим нагружением в компрессионном приборе (в пределах рассматриваемых 10 циклов), составляли до 10 % от общей осадки грунта.



Полученные результаты численных расчетов хорошо согласуются с результатами лабораторных испытаний глин. При моделировании первичного нагружения резервуара происходят основные вертикальные деформации грунта, при последующих циклах «нагрузка – разгрузка» отмечается дополнительное приращение деформаций грунта. Пластическая составляющая деформаций осадки основания резервуара для первичного нагружения и разгрузки составила 83–92 %. Также выявлено, что на этапах разгрузки грунт в основании резервуара частично восстанавливает свои деформации, проявляя упругие свойства. По данным численных расчетов при 20 циклах нагружения и разгрузки дополнительные осадки основания резервуара составляли 2,4–4,1 % от общей осадки.

Получено уравнение для предварительного прогноза максимальных вертикальных деформаций основания фундамента, сложенного глинами со значением показателя текучести от 0,58 до 1,05, для резервуара объемом 3 тыс. м<sup>3</sup> с учетом 20 циклов налива и опорожнения.

Численные расчеты показали, что значения расчетных осадок основания, сложенного мягкопластичными глинами, не превышают допустимых значений по ВСП 34-01-03. Однако для случаев текучепластичной и текучей глины полученные значения осадки превысили допустимые значения по ВСП 34-01-03. Это означает, что при наличии таких глин в основании резервуара необходимо предусматривать дополнительные технические решения, например: армирование основания геосинтетическими материалами, замену слабого грунта (при неглубоком его залегании), увеличение мощности грунтовой подушки.

Практический интерес представляют дальнейшие исследования работы грунта с многократным нагружением и разгрузкой как в лабораторных, так и в полевых условиях. За все время эксплуатации вертикальных стальных резервуаров для нефтепродуктов число циклов налива и опорожнения может составлять более 2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных деформаций грунтов в основании их фундаментов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мангушев Р.А., Кириллов В.М. Анализ закономерностей развития осадок фундаментов стальных цилиндрических резервуаров на слабых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 84–89. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-84-89. EDN VJRQZT.
2. Мирсаяпов И.Т., Сабирзянов Д.Д. Несущая способность основания фундаментов при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 153–163. EDN UOVUZO.
3. Kou H., Fang W., Zhou N., Huang J., Zhang X. Dynamic response of single-bucket foundation in clay under vertical variable amplitude cyclic loadings // Ocean Engineering. 2023. Vol. 273. P. 113973. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113973
4. Liu W., Tan J., Lv W., Chen Ch., Qu Sh. Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2025. Vol. 189. P. 109088. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109088
5. Zhang T., Li T., Feng Sh. Elastoplastic modelling for long-term cyclic stability of soft clays with consideration of structure damage // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 166. P. 107727. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107727
6. Schreinert G.G., Kern C., Lunkes Strieder H., Teixeira Brito L.A., Nunez W.P. Influence of number of load cycles on the resilient response of soils under

- repeated load triaxial tests // Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 50. P. 101493. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101493
7. Xiao X., Guan X., Wu Q., Zhao D., Zhou R., Chen G. Energy-based method for the failure criterion and resistance evaluation of marine clay under cyclic loading // Engineering Geology. 2025. Vol. 344. P. 107833. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107833
8. Tafili M., Albared A., Prada-Sarmiento L.F., Wichtmann T. Loading rate influence on high-cyclic loading of clays // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 173. P. 108103. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108103
9. Zhang J., Zhang A., Li J., Fan H. Enhanced understanding on permanent deformation behaviour of subgrade compacted clay under long-term cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. Vol. 187. P. 108972. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108972
10. Wang H.L., Sun Y.H., Chen R.P., Peng Ch.Y., Khasanov A. Deformation characteristics and stability analysis of lean clay under cyclic loading // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 47. P. 101285. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101285
11. Васильев Г.Г., Сальников А.П. Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 106–108. EDN TJFVMX.
12. Shuxin Zh., Chun K., Penggang Zh., Jinheng L., Yingjie Sh., Gang W. et al. Failure analysis of local settlement induced Q345R bottom plate cracking of crude oil

storage tank // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Issue 11. P. e11952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11952

13. Naseri H., Showkati H., Zirakian T. Experimental investigation of geometrical and physical behaviors of thin-walled steel tanks subjected to local support settlement // *Structures*. 2021. Vol. 34. Pp. 413–422. DOI: 10.1016/j.jistruc.2021.08.011

14. Семин А.С., Татьянников Д.А. Устройство фундамента на искусственном основании для стального вертикального резервуара // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 3. С. 37–44. DOI: 10.15593/24111678/2021.03.05. EDN RJOAVI.

15. Gunerathne S., Seo H., Lawson D.W., Jayawickrama P.W. Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 102. Pp. 136–147. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.05.008

16. Nassernia S., Showkati H. Experimental Investigation to local settlement of steel cylindrical tanks with constant and variable thickness // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 118. P. 104916. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104916

17. Naseri H., Zirakian T., Showkati H. Stability response assessment of steel thin-walled open-top tanks subjected to local support edge settlement // *World Jour-*

*nal of Engineering*. 2023. Vol. 22. Issue 1. Pp. 29–39. DOI: 10.1108/WJE-06-2023-0165

18. Кондратьева Л.Н., Бурцев Р.В., Горшков И.В. О применении моделей грунта Soft Soil и Hardening Soil Small-Strain в рамках задачи фильтрационной консолидации на различных этапах возведения и эксплуатации здания в условиях слабых грунтов // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 3 (92). С. 62–71. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-62-71. EDN EXGTGV.

19. Laham N., Kwa K., White D., Gourvenec S. A surrogate model to efficiently predict changing strength and stiffness of soft soils through whole-life episodic cyclic loading // *Computers and Geotechnics*. 2025. Vol. 177. P. 106895. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106895

20. Showkat R., Kumar Singh S., Sivakumar Babu G.L. Evaluation of dynamic properties of unsaturated soils under cyclic loading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025. Vol. 190. P. 109196. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109196

21. Sun J., Li J., Luo L., Luo W., Lu W. Dynamic responses of sand-clay mixtures under long-term cyclic loading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024. Vol. 178. P. 108500. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108500

Поступила в редакцию 28 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Евгения Николаевна Акбулякова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 6000-7675, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru;

**Карина Алексеевна Казаринова** — магистрант; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 6949-4578; karlnysik@mail.ru;

**Екатерина Давыдовна Телепова** — магистрант; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 3676-8762; telepovakat@gmail.com.

Вклад авторов:

Акбулякова Е.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Казаринова К.А. — проведение лабораторных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Телепова Е.Д. — проведение численных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Mangushev R.A., Kirillov V.M. Analysis of regularities of foundation settlement development of steel cylindrical tanks on soft soils. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 3(68):84–89. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-84-89. EDN VJRQZT. (rus.).

2. Mirsayapov I.T., Sabirzyanov D.D. Bearing capacity of foundations base under combined, alternating, longterm static and cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):153–163. EDN UOVUZO. (rus.).

3. Kou H., Fang W., Zhou N., Huang J., Zhang X. Dynamic response of single-bucket foundation in clay under vertical variable amplitude cyclic loadings. *Ocean Engineering*. 2023; 273:113973. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113973
4. Liu W., Tan J., Lv W., Chen Ch., Qu Sh. Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025; 189:109088. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109088
5. Zhang T., Li T., Feng Sh. Elastoplastic modeling for long-term cyclic stability of soft clays with consideration of structure damage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023; 166:107727. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107727
6. Schreinert G.G., Kern C., Lunkes Strieder H., Teixeira Brito L.A., Nunez W.P. Influence of number of load cycles on the resilient response of soils under repeated load triaxial tests. *Transportation Geotechnics*. 2025; 50:101493. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101493
7. Xiao X., Guan X., Wu Q., Zhao D., Zhou R., Chen G. Energy-based method for the failure criterion and resistance evaluation of marine clay under cyclic loading. *Engineering Geology*. 2025; 344:107833. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107833
8. Tafili M., Albared A., Prada-Sarmiento L.F., Wichtmann T. Loading rate influence on high-cyclic loading of clays. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023; 173:108103. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108103
9. Zhang J., Zhang A., Li J., Fan H. Enhanced understanding on permanent deformation behaviour of subgrade compacted clay under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024; 187:108972. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108972
10. Wang H.L., Sun Y.H., Chen R.P., Peng Ch.Y., Khasanov A. Deformation characteristics and stability analysis of lean clay under cyclic loading. *Transportation Geotechnics*. 2024; 47:101285. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101285
11. Vasiliev G.G., Salnikov A.P. Analysis of causes of accident with vertical steel tanks. *Oil Industry*. 2015; 2:106-108. EDN TJFVMX. (rus.).
12. Shuxin Zh., Chun K., Penggang Zh., Jinheng L., Yingjie Sh., Gang W. et al. Failure analysis of local settlement induced Q345R bottom plate cracking of crude oil storage tank. *Heliyon*. 2022; 8(11):e11952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11952
13. Naseri H., Showkati H., Zirakian T. Experimental investigation of geometrical and physical behaviors of thin-walled steel tanks subjected to local support settlement. *Structures*. 2021; 34:413-422. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.08.011
14. Semin A.S., Tatiannikov D.A. Arrangement of an artificial foundation for a vertical steel tank. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021; 3:37-44. DOI: 10.15593/24111678/2021.03.05. EDN RJOAVI. (rus.)
15. Gunerathne S., Seo H., Lawson D.W., Jayawickrama P.W. Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil. *Computers and Geotechnics*. 2018; 102:136-147. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.05.008
16. Nassernia S., Showkati H. Experimental Investigation to local settlement of steel cylindrical tanks with constant and variable thickness. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 118:104916. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2020.104916
17. Naseri H., Zirakian T., Showkati H. Stability response assessment of steel thin-walled open-top tanks subjected to local support edge settlement. *World Journal of Engineering*. 2023; 22(1):29-39. DOI: 10.1108/WJE-06-2023-0165
18. Kondratieva L.N., Burtsev R.V., Gorshkov I.V. On the application of soft soil model and hardening soil small-strain model in the context of filtration consolidation problem at various stages of the construction and operation of buildings in soft soil conditions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 3(92):62-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-62-71. EDN EXGTGV. (rus.).
19. Laham N., Kwa K., White D., Gourvenec S. A surrogate model to efficiently predict changing strength and stiffness of soft soils through whole-life episodic cyclic loading. *Computers and Geotechnics*. 2025; 177:106895. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106895
20. Showkat R., Kumar Singh S., Sivakumar Babu G.L. Evaluation of dynamic properties of unsaturated soils under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025; 190:109196. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109196
21. Sun J., Li J., Luo L., Luo W., Lu W. Dynamic responses of sand-clay mixtures under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024; 178:108500. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108500

Received February 28, 2025.

Adopted in revised form on March 8, 2025.

Approved for publication on June 6, 2025.

**B I O N O T E S :** **Evgeniya N. Akbulyakova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Operations and Geotechnical Engineering; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN-code: 6000-7675, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru;

**Karina A. Kazarinova** — master student; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN-code: 6949-4578; kar1nysik@mail.ru;

**Ekaterina D. Telepova** — master student; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN- code: 3676-8762; telepovacat@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Evgeniya N. Akbulyakova — academic advising, scientific editing of the text.*

*Karina A. Kazarinova — conducting experimental research, processing the collected material, writing a source text.*

*Ekaterina D. Telepova — conducting numerical studies, processing the collected material, writing a source text.*

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



# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.49

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1221-1231

## Актуальные вызовы организационного управления высокотехнологичными проектами компаний региона

Ирина Геннадьевна Ершова<sup>1</sup>, Захид Фаррух Мамедов<sup>2</sup>,  
Роман Владимирович Семенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия;

<sup>2</sup> Азербайджанский государственный экономический университет (АГЭУ);  
г. Баку, Азербайджанская Республика

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследуются актуальные вызовы и особенности использования современной модели организационного управления инновационной деятельностью организаций в регионе в условиях наступления периода Индустрии 5.0. Проводится сравнительный анализ применяемых основных моделей управления организационно-производственными процессами компаний. Рассматриваются ключевые аспекты использования современной (сетевцентричной) модели управления. Приводится краткая характеристика эффективности ее применения для инновационных компаний в регионе. Актуальность исследования связана с наличием организационно-технологических вызовов управления высокотехнологическими проектами в регионе. Предмет исследования — организационно-производственные модели управления наукоемкой деятельностью компаний. Научная новизна заключается в формировании современной концептуальной модели управления инновационной деятельностью и наукоемким производством технологических компаний в регионе. Практическая значимость проведенной научно-исследовательской работы состоит в переносе ее механизма в систему менеджмента управления инновационными процессами компаний.

**Материалы и методы.** Применены общие методы исследования (абстрагирование, обобщение, синтез), сравнительный анализ, изучение первоисточников (метод деконструкции), историко-генетический метод.

**Результаты.** В ходе проведения научного исследования были выбраны три основные организационно-производственные модели управления инновационной деятельностью предприятий в региональных экономических системах: 1) функциональная; 2) проектно-целевая и матричная; 3) современная модель или сетевцентричная. Определены условия использования каждой из них в зависимости от множества факторов: как построена организация производства; какая направленность бизнес-модели; какой масштаб производства; какой приоритет основной деятельности: является ли выпуск инновационной продукции исключением; сколько и какие подразделения задействованы при освоении и внедрении новых технологических разработок.

**Выводы.** Исследованные основные модели управления имеют свои отличительные особенности ведения производственно-организационной деятельности. Их выбор зависит от определенных потребностей бизнеса. Актуальным вызовам Индустрии 5.0 отвечает использование сетевцентричной организационно-производственной модели управления высокотехнологичными проектами в регионе. Ключевые особенности сетевцентричной модели заключаются в полной цифровой интеграции всех звеньев цепочек создания стоимости, организации умного виртуального пространства и поточной деятельности производства наукоемкой продукции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Индустрия 5.0, модели управления, организационно-производственная деятельность, инновационные компании, наукоемкое производство, экономика региона, высокотехнологичные проекты

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ершова И.Г., Мамедов З.Ф., Семенов Р.В. Актуальные вызовы организационного управления высокотехнологичными проектами компаний региона // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1221–1231. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1221-1231

Автор, ответственный за переписку: Ирина Геннадьевна Ершова, ershovairgen@yandex.ru.

## Current challenges of the modern model of organizational management of high-tech projects in the region

Irina G. Ershova<sup>1</sup>, Zahid F. Mamedov<sup>2</sup>, Roman V. Semenov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Azerbaijan State University of Economics (UNEC); Baku, Azerbaijan of Republic

## ABSTRACT

**Introduction.** This paper examines the current challenges and features of using the modern model of organizational management of innovative activities of organizations in the region in the context of the onset of the Industry 5.0 period. A comparative analysis of the applied basic management models of organizational and production processes of companies is carried out. The key aspects of using a modern (network-centric) management model are considered. A brief description of the effectiveness of its use for innovative companies in the region is given. The relevance of the research is related to the presence of organizational and technological challenges of managing high-tech projects in the region. The subject of the research is organizational and production management models of knowledge-intensive companies. The scientific novelty lies in the formation of a modern conceptual model for managing innovation and high-tech production of technology companies in the region. The practical significance of the research work carried out lies in the transfer of its mechanism to the management system for managing innovative processes of companies.

**Materials and methods.** General research methods (abstraction, generalization, synthesis), comparative analysis, study of primary sources (deconstruction method), historical and genetic method.

**Results.** During the scientific research, 3 main organizational and production models of enterprise innovation management in regional economic systems were selected: 1) functional; 2) design-oriented and matrix; 3) modern or network-centric model. The conditions of use of each of them are determined depending on many factors: how the production organization is built; what is the focus of the business model; what is the scale of production; what is the priority of the main activity: is the release of innovative products; an exception; how many and which departments are involved in the development and implementation of new technological developments.

**Conclusions.** The described basic management models have their own distinctive features of conducting production and organizational activities. Their choice depends on the specific needs of the business. The use of a network-centric organizational and production model for managing high-tech projects in the region meets the current challenges of Industry 5.0. The key features of the network-centric model are the complete digital integration of all links in value chains, the organization of a smart virtual space and the on-line production of high-tech products.

**KEYWORDS:** Industry 5.0, management models, organizational and production activities, innovative companies, knowledge-intensive production, regional economy, high-tech projects

**FOR CITATION:** Ershova I.G., Mamedov Z.F., Semenov R.V. Current challenges of the modern model of organizational management of high-tech projects in the region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1221-1231. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1221-1231 (rus.).

*Corresponding author:* Irina G. Ershova, ershovairgen@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитии мировых экономических систем актуальным стал вопрос исследования возможностей будущего перехода к модели Индустрии 5.0, революция которой заключается в достижении уровня высокой адаптивности к изменениям, приоритизации экологической устойчивости и человекоцентричности. Так, если в концепции Индустрии 4.0 главный акцент был сделан на преобладание киберфизических систем, то в Индустрии 5.0 ключевым направлением является персонализированная гуманистическая автоматизация, в которой человек действует как расширенный оператор и рабочее место, «оказывает поддержку» в адаптации производственных процессов к имеющимся потребностям работников. Важно отметить, что в Индустрии 5.0 в качестве главного звена выступает цифровая экосистема, особенностью которой служит использование цифровых двойников (виртуализация), мобильной экономики и платформизации [1]. Другое технологическое преобразование, связанное с переходом к модели Индустрии 5.0, — стирание границ функционирования «классической компании», ранее выступавшей в качестве автономной экономической единицы, формирующей ценности путем оказания услуг и производства товаров. В концепции Индустрии 5.0 акцент поставлен на создание «гибридной фирмы», которая будет построена с учетом виртуального сетевого взаимодействия и ориентирована на выполнение заказов «по требованию».

В данной ситуации возникает вопрос: «что будет происходить с компаниями, ключевой особенностью которых является выпуск высокотехнологичной продукции?». Ведь, как известно, они тоже играют ключевую роль в развитии Индустрии 5.0, в том числе в направлениях:

- 1) стимулирования экономического роста: создание рабочих мест и рост ВВП за счет коммерциализации новых технологий;
- 2) развития технологий: внедрение автоматизированных систем, интеллектуальных коллаборативных роботов;
- 3) устойчивого развития: разработка технологий, способствующих снижению вредного воздействия на окружающую среду (с использованием возобновляемых источников энергии, товаров замкнутого цикла экономики), а также ориентация на социальную ответственность;
- 4) сотрудничества и интеграции: формирование экосистемы кластеров, где несколько компаний, университетов и исследовательских организаций ведут совместную деятельность по созданию и диффузии инновационных продуктов на рынке;
- 5) клиентоцентричности и персонализации: разработка продуктов и услуг, учитывающих специфические потребности клиентов, а также применение данных для предложения индивидуализированных решений;
- 6) цифровизации и сетевого взаимодействия: использование и анализ больших данных для оптимизации процессов и принятия решений, внедрение

генеративного искусственного интеллекта для улучшения взаимодействия с клиентами и процессов производства.

Деятельность инновационных хозяйствующих субъектов в условиях виртуального сетевого взаимодействия, занимающихся созданием высокотехнологичных проектов, важно рассматривать в контексте экономики региона. В региональных экономических системах инновационные компании занимают центральную позицию, способствуют их динамичному развитию, а также выступают в качестве катализаторов социальных изменений, особая роль которых в Индустрии 5.0 неоднократно подчеркивается Федерацией бизнес-организаций в Японии «Кэйданрэн»<sup>1</sup>. Именно такое взаимодействие обеспечивает устойчивое развитие региона и создает благоприятную экосистему для будущих инноваций. Поэтому наличие этого нововведения, основанного на исчезновении границ «классической компании» в результате развития Индустрии 5.0 [2], поднимает проблему исследования актуальных вызовов в построении современной модели организационно-производственного управления наукоемкими процессами в регионе. В этих условиях в исследовании были определены цель, объект и предмет исследования.

Цель исследования — сформулировать ключевые особенности и принципы функционирования современной модели управления высокотехнологичными проектами в регионе, которая отвечает актуальным вызовам в условиях перехода к эпохе Индустрии 5.0.

Объект исследования — особенности процессов управления наукоемкой деятельностью инновационных компаний.

Предмет исследования — организационно-производственные модели управления наукоемкой деятельностью компаний в регионе.

На сегодняшний день довольно частым явлением стала ситуация, когда процессы внедрения наукоемкой продукции распределяются по подразделениям организационно-производственной структуры управления компании. При возникновении этой ситуации можно идентифицировать явную несовместимость подходов к внедрению нововведений и технологических разработок и форм реализации данных процессов. Так возникает задача фиксации изменений организационной и производственных моделей управления, определяющихся в ходе разработки и внедрения новаций.

Научная новизна заключается в формировании современной концептуальной модели управления инновационной деятельностью и наукоемким производством среди технологических компаний в регионе, которая будет отвечать основным потребностям Индустрии 5.0.

Практическая значимость настоящей научно-исследовательской работы состоит в возможности использования рассмотренных механизмов управления высокотехнологичными проектами в системе менеджмента инновационных кампаний в регионе. Это, в свою очередь, позволит оптимизировать производство высокотехнологичной продукции, повысить качество решений, принимаемых руководством относительно целесообразности ее дальнейшей разработки и выпуска. Представленные в статье рекомендации дадут возможность компаниям лучше понимать взаимосвязь между объемами производства, его планированием и организацией управления в зависимости от специфики деятельности хозяйствующего субъекта и особенностей выпускаемой продукции.

В ходе проведения научного исследования была проанализирована зарубежная и отечественная литература, посвященная анализу организационных структур управления среди малых инновационных компаний в региональных экономических системах; ключевых аспектов функционирования Индустрии 5.0 [3–10]. Отдельно изучены научные работы, направленные на исследование особенностей организации производства в зависимости от уровня готовности технологии. Так, ученый Н.Б. Бодин предлагает системный подход к оценке современной роли и места предприятия в производственной и космической деятельности госкорпорации «Роскосмос» [11]. Исследователи А.С. Обухова, А.А. Булгакова и А.Ю. Каракулин рекомендуют стратегическое планирование технологического развития в условиях инновационной экономики [12]. Методику оценки разрывов цифровой зрелости промышленных предприятий как инструмент организационного управления представляют в своей работе А.В. Бабкин, Е.В. Шкарупета, Т.А. Гилева и другие известные профессора [13]. Авторы Н.Б. Баканова и А.С. Баканов проводят анализ информационных потоков для мониторинга направлений деятельности организации [14]. В другой публикации Н.Б. Баканова изучает аспекты разработки сервисов поддержки управленческой деятельности на основе информационных ресурсов систем организационного управления [15]. А.Ю. Савицкий рассматривает методику работы должностных лиц в связи с применением цифровых двойников как элемент организационного управления [16]. Концепцию шести сигм предлагает использовать А.Н. Торхова для эффективной деятельности предприятия [17]. Научную статью Н.Н. Трофимова посвятила исследованию роли цифровых инструментов обучения персонала в управлении организационными изменениями предприятия на этапе его инновационного развития [18]. С.Л. Горобченко, Д.А. Ковалев, С.И. Затенко и другие предлагают применять ТТ-технологии в управлении цепочками поставок арматурных компаний [19]. Авторами также изучены методические рекомендации по сопоставлению уровня технологического развития и значений

<sup>1</sup> About Keidanren // Keidanren. 2025. URL: <https://www.keidanren.or.jp/en/profile/pro001.html>

ключевых показателей эффективности акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций, государственных компаний и федеральных государственных унитарных предприятий с уровнем развития и показателями ведущих компаний-аналогов [20]. Тем не менее недостаточно исследований проводится по вопросам актуальных вызовов организационного управления высокотехнологичными проектами в регионе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели исследования применена комплексная методология, включающая общие методы исследования (абстрагирование, обобщение, синтез), компаративный анализ, изучение первоисточников (метод деконструкции), историко-генетический метод. Агрегированное использование данных методов исследования образует комплексный подход к изучению особенностей функционирования современной модели управления высокотехнологичными проектами. Их применение позволяет не только проанализировать текущее состояние организационно-технологического аппарата управления инновационных компаний в регионе, но и сформировать пул требований к построению качественной модели управления высоко-

технологичными проектами в условиях наблюдающегося перехода к Индустрии 5.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведения научного исследования были выбраны три основные организационно-производственные модели управления инновационной деятельностью компаний в региональных экономических системах: 1) функциональная; 2) программно-целевая и матричная; 3) современная модель или сетцентричная.

Использование конкретной модели зависит от множества факторов:

- как построена организация производства;
- какая направленность бизнес-модели;
- какой масштаб производства;
- какой приоритет основной деятельности: является ли выпуск инновационной продукции исключением;
- сколько и какие подразделения задействованы при освоении и внедрении новых технологических разработок и другое.

Результаты сравнительного анализа организационно-производственных моделей управления для компаний, занимающихся инновационной деятельностью в регионе, представлены в таблице.

Сравнительная характеристика основных моделей организационно-производственного управления инновационной деятельностью компании в регионе<sup>2</sup>

Comparative characteristics of the main models of organizational and production management of innovative activities of an enterprise in the region<sup>2</sup>

Модель управления Management model	Функциональная Functional	Программно-целевая и матричная Programme-target and matrix	Сетцентричная (современная модель) Network-centric (modern model)
Связь с родительской моделью управления Connection with the parent management model	• иерархические и линейные модели [13] • hierarchical and linear models [13]	• матричная; • функциональная + дивизиональная • matrix; • functional + divisional	• матричная; • программно-предметная (целевая) • matrix; • programme-subject (target)
Механизм организации производства Mechanism of production organization	• размещение на одном постоянном участке (фиксированное); • каждое подразделение занимается выполнением конкретной функции • placement on one permanent site (fixed); • each division is engaged in the performance of a specific function	• использование производ- ственных ячеек; • осуществляется распределение по ресурсам [14] • use of production cells; • distribution by resources is carried out [14]	• создание умного виртуального пространства; • поточная деятельность в производстве (ритмичность, непрерывность, автоматизация); • цифровая интеграция всех звеньев цепочек создания стоимости • creation of a smart virtual space; • flow activity in production (rhythm, continuity, automation); • digital integration of all links in the value chain

<sup>2</sup> Разработано авторами на основе работ [13–20].



Окончание табл. / End of the Table

Модель управления Management model	Функциональная Functional	Программно-целевая и матричная Programme-target and matrix	Сетецентричная (современная модель) Network-centric (modern model)
Тип производства (для высокотехнологичной продукции) Type of production (for high-tech products)	<ul style="list-style-type: none"><li>• мелкосерийное и случайное;</li><li>• волнообразное;</li><li>• производство стандартизированной продукции;</li><li>• простые повторяющиеся операции</li><li>• small-scale and random;</li><li>• wave-like;</li><li>• production of standardized products;</li><li>• simple repetitive operations</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• производство по ячейкам [15];</li><li>• сборочные линии;</li><li>• опытно-серийное и конвейерное производство;</li><li>• выход на массовое производство</li><li>• cell production [15];</li><li>• assembly lines;</li><li>• pilot serial and conveyor production;</li><li>• mass production</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• непрерывное с возможностью агрегирования прерывающихся и постоянных процессов;</li><li>• высокие объемы производства [18]</li><li>• continuous with the possibility of aggregating intermittent and continuous processes;</li><li>• high production volumes [18]</li></ul>
Методологический инструментарий Methodological tools	<ul style="list-style-type: none"><li>• использование ленточных диаграмм с планом-графиком работ (модель Ганта);</li><li>• применение подхода теории решения изобретательских задач (ТРИЗ);</li><li>• методика концепции научной организации труда</li><li>• use of strip charts with a work schedule (Gantt model);</li><li>• application of the approach “Theory of Inventive Problem Solving”;</li><li>• methodology of the concept “Scientific Organization of Labor”</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• оценка уровней готовности технологии и производства (TRL) [16];</li><li>• концепция шесть сигм (6 SIGM) [17];</li><li>• программно-проектное управление (ППУ);</li><li>• управление цепочками поставок (SCM)</li><li>• assessment of technology and production readiness levels (TRL/MRL/CRL) [16];</li><li>• six sigma concept (6 SIGM) [17];</li><li>• program-project management (PPU);</li><li>• supply chain management (SCM)MRL/CRL)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• цифровые двойники;</li><li>• модульная система управления производством (e-Mes);</li><li>• бережливый стартап (Lean Startup);</li><li>• гибкие методологии управления проектами (SCRUM, CANBAN) [19]</li><li>• digital twins;</li><li>• modular manufacturing execution system (e-Mes);</li><li>• Lean Startup;</li><li>• flexible project management methodologies (SCRUM, CANBAN) [19]</li></ul>
Направленность бизнес-модели Business model focus	Ориентированная на продукт Product oriented	Продукт + сервис Product + service	Предоставление доступа к продукту + + плата за фактическое использование + достижение метрики и результата Providing access to the product + + payment for actual usage + + achieving metrics and results
Особенности построения процесса разработки высокотехнологических проектов Features of the construction of the process of development of high-tech projects	Не подходит, нет быстрого перемещения изделий по производственной линии, на практике протекает с использованием информатизации процессов Not suitable, there is no fast movement of products along the production line, in practice it occurs using process informatization	Доходит до перехода в конвейерное производство, автоматизация It comes to the transition to conveyor production, automation	Массовое производство наукоемкой продукции, выход на непрерывный объем производства. Цифровизация всех процессов деятельности [20] Mass production of high- tech products, reaching continuous production volume. Digitalization of all business processes [20]

Таким образом, исходя из проанализированных характеристик моделей, представленных в таблице, можно сделать следующие выводы: у российских компаний наиболее популярным является использование функциональной модели организационно-производственного управления. Функциональная модель организации производства подходит компаниям, которые занимаются массовым производством стандартизированных товаров или выполняют проектирование и производство под заказ. Данная модель применима в случаях, когда реализуется производство с низкой вариативностью и стандартизированными процессами. Однако, если компания занимается выпуском высокотехнологичной продукции, то минусы использования функциональной модели будут заключаться в следующем:

1. Возникновение конфликтов за ресурсы: в функциональной структуре разные участки могут конкурировать за ограниченные ресурсы (например, оборудование или материалы). Это может привести к конфликтам и замедлению процессов, особенно когда ресурсы необходимы одновременно для разных задач [13].

2. Увеличение продолжительности времени на межоперационное передвижение: функциональная организация производства часто приводит к тому, что различные операции расположены далеко друг от друга, что, в свою очередь, увеличивает время, затрачиваемое на перемещение материалов и сотрудников между участками. Это приводит к снижению продуктивности.

3. Ожидание и наличие простоев в очереди на обработку: если один участок перегружен, то это может вызвать задержки в последующих этапах производства. В результате возникает простой, который негативно сказывается на общей эффективности и скорости вывода продукта на рынок.

4. Трудность планирования работ и построения цепочек взаимозаменяемости между участками: в условиях высокой специализации и зависимости от отдельных функций достаточно сложно эффективно планировать производственные процессы. Непредвиденные задержки или изменения в одном участке могут негативно сказаться на всей цепочке поставок и производственной программе. Также специализация приводит к тому, что работники не могут легко переключаться между разными функциями или участками, что ограничивает гибкость компании [14].

В основном бизнес-модель компаний, работающих по функциональной модели организации производства, ориентирована на продукт, т.е. поставщик реализует продажу продукта или отдельной услуги, которые нужны на этапе использования данной единицы.

Важно понимать, что функциональный принцип организации производства продукции ограничен методологическим инструментарием его управ-

ления (диаграммы Ганта, ТРИЗ и т.д.). Следует сказать, что компаниям, которые применяют функциональную модель, не подойдут методологии Lean, SCRUM, CANBAN, так как при организации труда по функциональной модели основные затраты связаны с исключением «мусорных процессов» компании (например, базовый процесс движения детали, на который уходит 80 % времени). Причиной этому может выступать множество факторов: например, методология Lean требует гибкости и способности быстро реагировать на изменения [15]. Функциональная модель может быть менее гибкой из-за фиксированных ролей и обязанностей.

Популярностью среди российских инновационных компаний также пользуется применение модели программно-предметного (целевого) управления организационно-производственными процессами высокотехнологичной компании.

Отличительная особенность этой модели — построение производства с использованием ячеек и разделение по ресурсам. Это способствует более лучшему взаимодействию между специалистами разных областей (формирование междисциплинарных команд) [16]. Стоит отметить, что в рамках программно-целевой модели четко определяются цели на различных уровнях, происходит разделение по ресурсам и интеграция информационных технологий (внедрение современных платформенных сервисов по управлению данными, мониторинг процессов выполнения задач, автоматизация процессов). Также другой особенностью программно-целевой модели является приоритизация культуры улучшений (внедрение практик постоянного совершенствования и наличие системы обратной связи между ячейками и руководством, которая помогает идентифицировать проблемы и находить пути их решения) [17]. По сути, модель программно-целевого управления заложена в деятельности современных научно-производственных объединений [18]. Производство высокотехнологичной продукции в указанных компаниях происходит на уровнях опытно-серийного и конвейерного [19, 20]. На последнем этапе осуществляется подготовка к выходу на массовое производство высокотехнологичной продукции.

Также необходимо обратить внимание на то, что бизнес-модель компаний, работающих по модели программно-целевого управления, ориентирована не только на продукт, но и на сервис (например, услуги послепродажного обслуживания).

В условиях будущего перехода к Индустрии 5.0 эта данная модель имеет следующие недостатки:

1. Излишек ресурсов: инвестиции в избыточные ресурсы могут повлиять на финансовую устойчивость компании, особенно если ресурсы не используются в полной мере. Такая ситуация может привести к проблемам с ликвидностью и снижению прибыли.

2. Наличие высоких квалификационных характеристик: для успешной реализации наукоемких

проектов требуется высокая квалификация сотрудников, что может потребовать значительных затрат на обучение и развитие персонала и увеличить общие расходы компании<sup>3</sup>.

3. Каждая деталь должна иметь свое предназначение: наличие деталей или материалов, которые не относятся к конкретным ячейкам или группам, может привести к неэффективному использованию ресурсов и потере времени на их поиск и распределение.

Самой новой по сравнению с предыдущими моделями является сетцентричная, ключевая особенность которой заключается в использовании цифрового виртуального пространства при управлении организационными и производственными процессами компании. Как правило, сетцентричная модель применима в том случае, когда компания занимается уже массовым выпуском наукоемкой продукции, прошедшей этап создания опытного образца и производство по ячейкам. Использование этой модели позволяет компаниям увеличить производительность труда за счет создания новой системы разделения труда, в которой полностью цифровизирована деятельность человека в роли ЛПР (лицо, принимающее решение) в условиях межмашинного взаимодействия. Другая отличительная особенность современной модели — применение инновационных бизнес-моделей (нового формата), которые ориентированы на использование (ценность формируется за фактически потраченное время при использовании продукта) и результат (ценность формируется за достижение определенных показателей эффективности).

Сетцентричная модель управления подходит регионам, в которых функционируют особые экономические зоны (ОЭЗ) промышленно-производственного типа, основная задача которых — запуск высокотехнологичных проектов. Один из таких примеров — создание в 2022 г. ОЭЗ «Третий полюс» на территории Курской области (Железногорский район). В рамках ОЭЗ «Третий полюс» запланировано возведение современных инновационных комплексов, нацеленных на производство высокотехнологичной продукции для дальнейшей глубокой переработки<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Методические рекомендации по сопоставлению уровня технологического развития и значений ключевых показателей эффективности акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций, государственных компаний и федеральных государственных унитарных предприятий с уровнем развития и показателями ведущих компаний-аналогов. 2017. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/file/535256e8193016b438e70338a9a0d42d/metodic\\_ta\\_mrg.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/535256e8193016b438e70338a9a0d42d/metodic_ta_mrg.pdf)

<sup>4</sup> О создании на территориях муниципальных образований «город Железногорск» и «Железногорский район» Курской области особой экономической зоны промышленно-производственного типа : Постановление Правительства Российской Федерации от 26.02.2022 г. № 244. URL: <https://www.consultant.ru>

На сегодняшний день в ОЭЗ «Третий полюс» действуют следующие компании: 1) ООО «Цинкум»; 2) ООО «Передовые технологии машиностроения»; 3) ООО «Михайловский ГБЖ»; 4) ГК «Вагонмаш»; 5) ГК «Кварц».

Важно отметить, что все пять компаний объединяет одно — использование программно-целевой (программно-предметной) модели управления:

1. ООО «Цинкум» занимается производством цинковых изделий и применяет производство по ячейкам, в рамках которых организованы рабочие группы с распределением ответственных за конкретный этап производства цинковых изделий.

2. ГК «Кварц» изготавливает кварцевые изделия для различных отраслей. В компании используется программное обеспечение для планирования ресурсов в зависимости от текущих заказов и производственных потребностей.

3. ГК «Вагонмаш» производит железнодорожный подвижной состав. В производственных цехах компании созданы ячейки, которые отвечают за сборку различных компонентов вагонов<sup>5</sup>.

4. ООО «Передовые технологии машиностроения» специализируется на разработке и производстве высокотехнологичного машиностроительного оборудования. В компании организованы ячейки, работающие над конкретными проектами. Входит в ГК «Вагонмаш».

5. ООО «Михайловский ГБЖ» занимается производством горно-обогачительного оборудования. Ресурсы в компании распределяются на основе программного планирования<sup>6</sup>.

Однако использование программно-целевой модели управления среди компаний-участников ОЭЗ «Третий полюс», созданной с целью налаживания эффективного управления высокотехнологичными проектами в Курской области, приводит к возникновению ряда проблем, одной из которых является наличие разрывов между «уровнем технологической готовности продукта» и «уровнем готовности к выходу на серийное производство» (т.е. при создании в конструкторском бюро прототипа высокотехнологичного продукта и проведении испытаний в условиях, приближенных к реальным, происходит переход к начальной стадии определения основных производственных возможностей прототипа вместо запуска его производства на опытном заводе). Наличие данных разрывов приводит, прежде всего, к статичности производственных процессов региональных компаний, которые занимаются запуском высокотехнологичных проектов, недополучению выручки, росту себесто-

<sup>5</sup> Компания «Цинкум» стала резидентом ОЭЗ «Третий полюс». URL: <https://zincum.eco/tpost/y09e4y7tz1-kompaniya-tsinkum-stala-rezidentom-oez-t>

<sup>6</sup> Михайловский ГБЖ. URL: [https://www.metalloinvest.com/media/press\\_releases/522030/?utm\\_source=yandex.ru&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=yandex.ru&utm\\_referrer=yandex.ru](https://www.metalloinvest.com/media/press_releases/522030/?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru)

имости продукции (из-за наличия повторения процессов подготовки высокотехнологичной продукции к выходу на производство), а также снижению производительности труда (из-за «жесткого планирования», отсутствия цифровизация основных управленческих и организационно-производственных процессов).

Внедрение сетецентричной модели управления для компаний ОЭЗ «Третий полюс» позволит организовать гибкую систему взаимодействия, которая будет отвечать всем актуальным вызовам организационно-производственного управления высокотехнологичными проектами в регионе, а также обеспечит успешную реализацию запланированных к 2031 г. показателей — достижение объема инвестиций резидентов ОЭЗ в Курской области в размере 39 974,7 млн руб.<sup>7</sup>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описанные выше модели характеризуют отличительные элементы ведения производственно-организационной деятельности управления высокотехнологичными проектами компаний региона. Их выбор зависит от определенных потребностей бизнеса. Например, функциональная модель подойдет в тех случаях, когда нужно быстро запустить производство стандартизированной продукции или необходимо начать выпуск детали, уровень готовности технологии которой не менялся на протяжении долгих лет и с ним совпадает уровень готовности производства, или, когда важна роль фиксированного размещения на участке. Программно-целевая модель подойдет в ситуации, когда компания занимается научно-производственной деятельностью и выпуск технологической разработки нужно довести лишь до опытно-серийного и конвейерного производства.

Однако актуальным вызовам Индустрии 5.0 отвечает использование сетецентричной организационно-производственной модели управления высокотехнологичными проектами в регионе.

Ключевые особенности сетецентричной модели заключаются в полной цифровой интеграции

всех звеньев цепочек создания стоимости, организации умного виртуального пространства и поточной деятельности производства наукоемкой продукции. В условиях быстро меняющегося рынка и потребительских предпочтений сетецентричная модель позволяет быстро адаптироваться к новым условиям. Полная цифровая интеграция обеспечивает мгновенный доступ к данным и аналитике, что дает возможность оперативно реагировать на изменения и оптимизировать процессы. В рамках современной модели создается умное виртуальное пространство, которое способствует обмену знаниями и идеями между различными участниками. Это создает условия для инновационного мышления и креативности, что служит ключевым аспектом Индустрии 5.0.

Сетецентричная модель управления подходит для регионов, где действуют особые экономические зоны промышленного типа, главная цель которых заключается в реализации высокотехнологичных проектов.

В настоящее время мировые инновационные компании, которые успешно внедрили сетецентричную модель управления, перешли на новый экономический уклад (индустриальная революция) и стали лидером в отрасли. Самые простые примеры компании — это Intel, Tesla, IBM. В основе коммерциализации деятельности данных компаний заложена гибридная бизнес-модель, которая ориентирована на предоставление трех ценностей клиентам: возможность приобрести доступ к продукту за фиксированную регулярную плату к нему; возможность платить за время, которое было потрачено фактически за пользование продуктом; возможность платить за достижение результата, установленного по контракту.

Сетецентричная (современная) модель отвечает актуальным вызовам благодаря следующим аспектам: обеспечение прозрачности и доступности информации, цифровизация процессов; возможность оперативно реагировать на изменения в рыночной среде; гибкое производство под потребности клиентов; сетевое взаимодействие; использование гибкой методологии управления проектом. Переход на сетецентричную модель управления позволит компаниям, которые занимаются выпуском высокотехнологичной продукции в своем регионе, значительно увеличить производительность.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розанова Н.М. Индустрия 5.0: золотой век или прыжок в темноту? // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 6. С. 61–77. DOI: 10.52180/2073-6487\_2023\_6\_61\_77. EDN JXQKBZ.

2. Макаров Н.Ю., Ковалев П.П., Колмыкова Т.С. Инновационное развитие высокотехнологичных про-

изводств в цифровой экономике. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2023. 199 с. EDN LAMYQN.

3. Smilyanets V. Functional Model of the Management System for the Development of Innovative Potential of Airline Companies on the Basis of Marketing Concept // Green, Blue and Digital Economy Journal. 2023. Vol. 4. Issue 4. Pp. 19–27. DOI: 10.30525/2661-5169/2023-4-3



4. Attah R.U., Garba B.M.P., Gil-Ozoudeh I., Iwuanyanwu O. Cross-functional team dynamics in technology management : a comprehensive review of efficiency and innovation enhancement // Engineering Science & Technology Journal. 2024. Vol. 5. Issue 12. Pp. 3248–3265. DOI: 10.51594/estj.v5i12.1756

5. Pirogova O., Maltseva I., Polozhentseva Y. RETRACTED: Ensuring sustainable development: Opportunities for labor productivity growth through artificial intelligence // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 138. P. 03037. DOI: 10.1051/biconf/202413803037

6. Mendes D.S.F.T., Navas H.V.G., Charrua-Santos F.M.B. Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0 // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2023. Vol. 29. Issue 4. Pp. 842–862. DOI: 10.1108/JQME-09-2022-0055

7. Rahnema H., Johansen K., Larsson L., Rönnbäck A. Exploring digital innovation in the production process: a suggested framework for automation technology solution providers // Procedia CIRP. 2021. Vol. 104. Pp. 803–808. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.135

8. Solovieva Yu. National innovation systems and technology transfer of SCO countries // Asia and Africa Today. 2022. Issue 4. P. 51. DOI: 10.31857/S03215075-0019732-7

9. Shinkevich A.I., Nadezhkina M.E., Solovov S.A. Interaction of logistic and production systems of the petrochemical industry in the conditions of industry 4.0 // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 531. P. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202453101015

10. Mityakov S., Bolonicheva T., Kolesov K., Mityakova O., Murashova N. The benchmarking analysis of ESG transformation models of socio-economic systems in various countries // Nexa Revista Cientifica. 2023. Vol. 36. Issue 05. Pp. 147–168. DOI: 10.5377/nexo.v36i05.17303

11. Бодин Н.Б. Системный подход к оценке современной роли и места АО «НПО “Техномаш” им. С.А. Афанасьева» в производственной и космической деятельности Госкорпорации «Роскосмос» (часть II) // Экономика космоса. 2023. Т. 2. № 4 (6). С. 35–51. DOI: 10.48612/agt/space\_economics/2023.02.06.04

12. Обухова А.С., Булгакова А.А., Каракулин А.Ю. Стратегическое планирование технологического раз-

вития в условиях инновационной экономики // Вестник Академии знаний. 2024. № 2 (61). С. 692–694. EDN XLXGZH.

13. Бабкин А.В., Шкарунета Е.В., Гилева Т.А., Положенцева Ю.С., Чэнь Л. Методика оценки разрывов цифровой зрелости промышленных предприятий // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2022. Т. 13. № 3. С. 443–458. DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.443-458. EDN MHCQBQ.

14. Баканова Н.Б., Баканов А.С. Анализ информационных потоков для мониторинга направлений деятельности организации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. № 3. С. 13–20. DOI: 10.14357/20718632230302. EDN SLZHST.

15. Баканова Н.Б. Аспекты разработки сервисов поддержки управленческой деятельности на основе информационных ресурсов систем организационного управления. Часть 2 // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда. 2024. Т. 9. № 1. С. 117–132. DOI: 10.38098/ipran.opwp\_2024\_30\_1\_006. EDN UMISQR.

16. Савицкий А.Ю. Методика работы должностных лиц по связи с применением цифровых двойников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 1. С. 15–24. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-15-16. EDN DFDILP.

17. Торхова А.Н. Концепция шесть сигм // Экономика и социум. 2022. № 4–3 (95). С. 466–469. EDN AFKKLO.

18. Трофимова Н.Н. Роль цифровых инструментов обучения персонала в управлении организационными изменениями предприятия на этапе его инновационного развития // Экономика образования. 2024. № 6 (145). С. 115–126. EDN ENREFQ.

19. Горобченко С.Л., Ковалёв Д.А., Затенко С.И., Ржавцев А.А., Загидуллин Р.Р., Ковалева Ю.С. Применение ТТ-технологий в управлении цепочками поставок арматурных компаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 313–320. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-311-312. EDN EEGFQS.

20. Верстина Н.Г., Цуверкалова О.Ф. Современное состояние инновационной деятельности регионов РФ // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 769–789. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.769-789

Поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 30 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 30 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Ирина Геннадьевна Ершова — доктор экономических наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; SPIN-код: 1024-2161, Scopus: 56707193700, ORCID: 0000-0002-0675-0764; ershovairgen@yandex.ru;

Захид Фаррух Мамедов — доктор экономических наук, профессор, директор департамента организации и управления научной деятельностью; Азербайджанский государственный экономический университет (АГЭУ); 1001, г. Баку, ул. Истиглалият, д. 6, Азербайджанская Республика; SPIN-код: 4640-3857, Scopus: 55754276600, ORCID: 0000-0001-6425-8690; prof.zahid.mamed@mail.ru;

Роман Владимирович Семенов — аспирант кафедры финансов и кредита; Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; SPIN-код: 5623-6052, РИНЦ ID: 1185826, ORCID: 0009-0006-8118-106X; semenov0987@gmail.com.

Вклад авторов:

Ершова И.Г. — научное руководство, концепция исследования, редактирование текста.

Мамедов З.Ф. — планирование исследования, итоговые выводы.

Семенов Р.В. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Rozanova N.M. Industry 5.0: a golden age or a leap into the dark? *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2023; 6:61-77. DOI: 10.52180/2073-6487\_2023\_6\_61\_77. EDN JXQKBZ. (rus.).
2. Makarov N.Yu., Kovalev P.P., Kolmykova T.S. *Innovative development of high-tech industries in the digital economy*. Kursk, ZAO "University Book", 2023; 199. EDN LAMYQN. (rus.).
3. Smilyanets V. Functional Model of the Management System for the Development of Innovative Potential of Airline Companies on the Basis of Marketing Concept. *Green, Blue and Digital Economy Journal*. 2023; 4(4):19-27. DOI: 10.30525/2661-5169/2023-4-3
4. Attah R.U., Garba B.M.P., Gil-Ozoudeh I., Iwuanyanwu O. Cross-functional team dynamics in technology management : a comprehensive review of efficiency and innovation enhancement. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024; 5(12):3248-3265. DOI: 10.51594/estj.v5i12.1756
5. Pirogova O., Maltseva I., Polozhentseva Y. RETRACTED: Ensuring sustainable development: Opportunities for labor productivity growth through artificial intelligence. *BIO Web of Conferences*. 2024; 138:03037. DOI: 10.1051/bioconf/202413803037
6. Mendes D.S.F.T., Navas H.V.G., Charrua-Santos F.M.B. Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2023; 29(4):842-862. DOI: 10.1108/JQME-09-2022-0055
7. Rahnama H., Johansen K., Larsson L., Rönnbäck A. Exploring digital innovation in the production process: a suggested framework for automation technology solution providers. *Procedia CIRP*. 2021; 104:803-808. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.135
8. Solovieva Yu. National innovation systems and technology transfer of SCO countries. *Asia and Africa Today*. 2022; 4:51. DOI: 10.31857/S032150750019732-7
9. Shinkevich A.I., Nadezhkina M.E., Solovov S.A. Interaction of logistic and production systems of the petrochemical industry in the conditions of industry 4.0. *E3S Web of Conferences*. 2024; 531:01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202453101015
10. Mityakov S., Bolonicheva T., Kolesov K., Mityakova O., Murashova N. The benchmarking analysis of ESG transformation models of socio-economic systems in various countries. *Nexo Revista Científica*. 2023; 36(05):147-168. DOI: 10.5377/nexo.v36i05.17303
11. Bodin N.B. Systems approach to assessing the modern role and place of JSC NPO Tekhnomash named after S.A. Afanasyev in the production and space activities of the State Corporation Roscosmos (part II). *Space Economy*. 2023; 2(4):(6):35-51. DOI: 10.48612/agat/space\_economics/2023.02.06.04 (rus.).
12. Obukhova A.S., Bulgakova A.A., Karakulin A.Yu. Strategic planning for state management of technological development. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024; 2(61):692-694. EDN XLXGZH. (rus.).
13. Babkin A.V., Shkarupeta E.V., Gileva T.A., Polozhentseva Yu.S., Chen L. Methodology for assessing digital maturity gaps in industrial enterprises. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2022; 13(3):443-458. DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.443-458. EDN MIHCBQ. (rus.).
14. Bakanova N.B., Bakanov A.S. Analysis of information flows to monitor the activities of the organization. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2023; 3:13-20. DOI: 10.14357/20718632230302. EDN SLZHST. (rus.).
15. Bakanova N.B. Aspects of developing services to support management activities on the basis of information resources of organizational management systems. Institute of psychology of the Russian Academy of Sciences. *Organizational psychology and labor psychology*. 2024;9(1):117-132. DOI: 10.38098/ipran.opwp\_2024\_30\_1\_006. EDN UMISQR. (rus.).
16. Savitsky A.Yu. Work methodology of officials in connection with the use of digital twins. *Izvestiya Tula State University*. 2025; 1:15-24. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-15-16. EDN DFDILP. (rus.).
17. Torkhova A.N. Six sigma concept. *Economy and Society*. 2022; 4-3(95):467-469. EDN AFXKLO. (rus.).
18. Trofimova N.N. The role of digital personnel training tools in managing organizational changes in

an enterprise during its innovative development. *Economics of Education*. 2024; 6(145):115-126. EDN ENREFQ. (rus.).

19. Gorobchenko S.L., Kovalev D.A., Zatenko S.I., Rzhavtsev A.A., Zagidullin R.R., Kovaleva Yu.S. Application of it technologies in supply chain management of valves companies. *Izvestiya Tula State Univer-*

*sity*. 2023; 9:313-320. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-311-312.18. EDN EEGFQS. (rus.).

20. Verstina N.G., Tsuverkalova O.F. Current state of innovative activities in the Russian regions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):769-789. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.769-789 (rus.).

*Received April 16, 2025.*

*Adopted in revised form on June 30, 2025.*

*Approved for publication on June 30, 2025.*

**B I O N O T E S:** **Irina G. Ershova** — Doctor of Economics, Professor; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040, Russian Federation; SPIN-code: 1024-2161, Scopus: 56707193700, ORCID: 0000-0002-0675-0764; ershovairgen@yandex.ru;

**Zahid F. Mamedov** — Doctor of Economics, Professor, Director of the Department of Organization and Management of Scientific Activity; **Azerbaijan State University of Economics (UNEC)**; 6 Istiglaliyyat st., Baku, 1001, Azerbaijan of Republic; SPIN-code: 4640-3857, Scopus: 55754276600, ORCID: 0000-0001-6425-8690; prof.zahid.mamed@mail.ru;

**Roman V. Semenov** — postgraduate student of the Department of Finance and Credit; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040, Russian Federation; SPIN-code: 5623-6052, ID RSCI: 1185826, ORCID: 0009-0006-8118-106X; semenov0987@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Irina G. Ershova — scientific supervision, research concept, text editing.*

*Zahid F. Mamedov — research planning, final conclusions.*

*Roman V. Semenov — idea, collection and processing of material, writing of the original text.*

*The authors declare no conflicts of interest.*

# Цифровой маркетинг как инструмент продвижения регионов

Айна Джумартовна Елфимова<sup>1</sup>, Ферид Гаджиевна Малиева<sup>2</sup>,  
Дилдора Джабборхоновна Пашаходжаева<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Российский университет кооперации; Московская область, г. Мытищи, Россия;*

<sup>3</sup> *Самаркандский институт экономики и сервиса; г. Самарканд, Республика Узбекистан*

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Процессы цифровизации усиливают конкуренцию между регионами за инвестиции, туристов и человеческие ресурсы. Поиск эффективных цифровых инструментов территориального продвижения становится все более актуальным. Несмотря на растущий интерес к цифровому маркетингу, научные исследования в области его применения для продвижения регионов остаются фрагментарными. Цель исследования — определить роль, возможности и ограничения использования цифрового маркетинга в формировании положительного имиджа региона и повышении его привлекательности.

**Материалы и методы.** При исследовании процессов цифровизации маркетинга для продвижения регионов применены комплексный подход и общенаучные методы: анализ и изучение литературы, стратегий продвижения, кейсов цифрового маркетинга в регионах, сопоставление опыта разных регионов в использовании цифрового маркетинга. Приведена группировка инструментов цифрового маркетинга.

**Результаты.** Выявлены основные инструменты цифрового маркетинга для продвижения регионов, установлены особенности применения цифрового маркетинга в территориальном продвижении. Систематизирован опыт успешных регионов и определены типичные проблемы в цифровом продвижении.

**Выводы.** Цифровой маркетинг стал важнейшим инструментом повышения узнаваемости и привлекательности регионов. Без активного присутствия в цифровой среде регион проигрывает конкуренцию за туристов, инвесторов и новых жителей. Успешное продвижение требует комплексного подхода, одного канала (например, только сайта или только социальных сетей) недостаточно. Нужна система действий, связанная единой идеей бренда региона. Бренд региона должен быть четким и понятным целевым аудиториям. Бессистемное продвижение без ясно сформулированного имиджа приводит к размытию восприятия региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** маркетинг территорий, территориальный маркетинг, цифровой маркетинг, маркетинг регионов, digital-маркетинг, таргетированная реклама, контекстная реклама, SEO-продвижение, айдентика, брендинг

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Елфимова А.Д., Малиева Ф.Г., Пашаходжаева Д.Д. Цифровой маркетинг как инструмент продвижения регионов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1232–1241. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1232-1241

Автор, ответственный за переписку: Айна Джумартовна Елфимова, elfimovaad@mgsu.ru.

## Digital marketing as a place promotion tool

Aina D. Elfimova<sup>1</sup>, Ferida G. Malieva<sup>2</sup>, Dildora D. Pashakhodzhaeva<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Russian University of Cooperation; Moscow region, Mytishchi, Russian Federation;*

<sup>3</sup> *Samarkand Institute of Economics and Service; Samarkand, Republic of Uzbekistan*

## ABSTRACT

**Introduction.** Digitalization processes intensify competition for investments, tourists and human resources among places. Hence, searching for effective digital tools, designed to promote places, is increasingly relevant. Despite the growing interest in digital marketing, scientific research into its use for place promotion purposes remains fragmentary. The mission of this study is to determine the role, the potential and limitations of digital marketing in creating a positive image of a place and making it more attractive.

**Materials and methods.** An integrated approach and general research methods were employed to study marketing digitalization processes for place promotion purposes. They included analysis and study of literature, promotion strategies, and digital marketing cases used in particular places. The article also clusters digital marketing tools.

**Results.** The study identified the main digital marketing tools used to promote places, as well as characteristic features of digital marketing tools employed. Successful place promotion strategies were systematized and typical digital promotion problems were identified.

**Conclusions.** Digital marketing is the most important tool used to boost the visibility and attractiveness of places. Places lose the competition for tourists, investors and new residents without a strong presence in the digital environment. Success-



ful promotion requires a comprehensive approach; one communication channel (for example, a website or social networks) is not enough: a system of actions is needed, and it should be consolidated by a single idea of a local brand. A local brand must be clear and comprehensible to target audiences. Inconsistent promotion without a clearly formulated image leads to unclear perception places.

**KEYWORDS:** marketing of areas, place marketing, digital marketing, marketing of regions, digital marketing, targeted advertising, contextually targeted advertising, SEO promotion, identity, branding

**FOR CITATION:** Elfimova A.D., Malieva F.G., Pashakhodzhaeva D.D. Digital marketing as a place promotion tool. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1232-1241. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1232-1241 (rus.).

*Corresponding author:* Aina D. Elfimova, elfimovaad@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Маркетинг территорий особенно актуален в настоящее время по причине развития территорий России. Подтверждением тому служит организация и проведение Олимпиады «Сочи – 2014», Чемпионата мира по футболу 2018 г., летней Универсиады 2013 в Казани и других мероприятий<sup>1</sup>.

Научная новизна исследования заключается в огромном количестве современных вызовов регионального развития, которые требуют пересмотра стратегий продвижения регионов в условиях цифровизации [1]. Необходима систематизация цифровых маркетинговых инструментов с точки зрения их эффективности в продвижении территорий. Авторская гипотеза состоит в том, что целенаправленное применение инструментов именно цифрового маркетинга способствует устойчивому повышению конкурентоспособности региона. Для проверки гипотезы в данном исследовании применяются методы контент-анализа и сравнительного анализа кейсов.

Анализ литературы показывает, впервые маркетинг территорий как отдельное направление научной деятельности появился в середине 1990-х гг. Обусловлено это было социально-экономическим развитием стран и регионов, а также необходимостью изучения конкурентоспособности территорий [2]. Значительный вклад в изучение территориального маркетинга внесли Ф. Котлер и Д. Хайдер, авторы книги «Маркетинг территорий»<sup>2</sup>, в которой впервые был сформирован новый подход — продвижение территориального продукта.

В 2005 г. последовали активные публикации С. Анхольта (советник британского правительства), который ввел ключевые термины «брендинг территорий» (place branding), «брендинг государств» (nation branding). В своем труде «Бренд всем судья» Анхольт стал рассматривать бренды как основной инструмент распределения добавленной стоимо-

сти, брендинг территорий как ключ к решению проблем стран. А в книге «Бренд “Америка”» Анхольт<sup>3</sup> анализировал влияние товарных брендов на имидж страны, а также рассмотрел Америку как самостоятельный и зонтичный бренд<sup>4</sup>.

В 2008 г. вышла книга израильских ученых Э. Аврахама и Э. Кеттера «Медиастратегии по маркетингу территорий в кризис»<sup>5</sup>, которые анализировали коммуникации как ключевой фактор формирования имиджа территорий, а также сделали подробный анализ стратегий изменения (так называемого «ремонта») имиджа городов, стран и курортов.

В российских исследованиях вопросы брендинга и позиционирования регионов освещались в работах О.Н. Жильцовой<sup>1</sup>, А.А. Угрюмовой, М.В. Савельевой, Е.В. Ерохиной<sup>3</sup>, В.И. Алешниковой<sup>6</sup>, Т.В. Сачук<sup>7</sup>, А.В. Чечулина<sup>8</sup> и других отечественных ученых. Однако их труды преимущественно сосредоточены на традиционных инструментах маркетинга, в то время как изучение цифровых инструментов требует дальнейшего теоретико-прикладного осмысления.

<sup>3</sup> Анхольт С., Хильдрет Д. Бренд Америка: мать всех брендов, как культурные ценности одной нации завоевывают сердца и умы миллионов людей в других странах благодаря правильно построенным маркетинговым стратегиям / пер. с англ. А. Дадыкин. М. : Добрая книга, 2010. 231 с.

<sup>4</sup> Маркетинг территорий : учебник для вузов / под общ. ред. А.А. Угрюмовой, М.В. Савельевой, Е.В. Ерохиной. 3 изд., перераб. и доп. М. : Издательство Юрайт, 2025. 451 с. URL: <https://urait.ru/bcode/563518>

<sup>5</sup> Avraham E., Ketter E. Media Strategies for Marketing Places in Crisis: Improving the Image of Cities, Countries and Tourist Destinations. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2008.

<sup>6</sup> Алешникова В.И. Введение в маркетинг территорий : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2024. 272 с. DOI: 10.12737/1200565. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2157173>

<sup>7</sup> Сачук Т.В. Территориальный маркетинг: теория и практика : учебник. 2 изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2024. 561 с. DOI: 10.12737/2062425. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2062425>

<sup>8</sup> Чечулин А.В. Маркетинг территорий. Как города и страны привлекают туристов, новых жителей и бизнес : монография. СПб. : КАРО, 2024. 144 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/141682.html>

<sup>1</sup> Маркетинг территорий : учебник и практикум для вузов / под общ. ред. О.Н. Жильцовой. М. : Издательство Юрайт, 2024. 261 с. // Образовательная платформа Юрайт. URL: <https://urait.ru/bcode/536037>

<sup>2</sup> Котлер Ф. и др. Привлечение инвестиций, предприятий, жителей и туристов в города, коммуны, регионы и страны Европы. 2009.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территориальный маркетинг — это деятельность по формированию положительного образа региона, привлечению инвестиций и бизнеса, туристов, новых жителей и квалифицированных кадров. Основное отличие маркетинга территорий от коммерческого маркетинга заключается в отсутствии конкретного товара. Продуктом выступает территория, со всеми ее характеристиками: экономическими, культурными, природными и социальными.

Процессы территориального маркетинга, продвижения регионов предписывают учет интересов разных целевых аудиторий. К ним, как уже говорилось ранее, относятся инвесторы, туристы, местные жители и представители органов власти. Каждая из этих групп нуждается в специфической информации и индивидуальном подходе. Это делает маркетинг территорий сложным и многослойным процессом [3, 4]. По этой причине традиционные инструменты маркетинга территорий недостаточны для полноценного влияния на целевые аудитории, использование цифровых технологий позволяет улучшить коммуникацию и усилить взаимодействие с целевыми аудиториями [5]. Интерактивность цифровой среды делает восприятие региона более живым и привлекательным.

В литературе можно встретить разные термины: цифровой маркетинг, digital marketing, диджитал-маркетинг, онлайн-маркетинг, новый маркетинг, электронный маркетинг, интернет-маркетинг, таргетированный маркетинг, интерактивный маркетинг и прочее. Все они обозначают одно и то же: привлечение потенциальных потребителей к приобретению товаров и услуг компании [6].

Цифровой маркетинг представляет собой совокупность инструментов и стратегий, направленных на продвижение продуктов, услуг или объектов с использованием цифровых каналов [7, 8]. К чис-

лу основных каналов относятся сайты, поисковые системы, социальные сети, e-mail-рассылки, мобильные приложения и онлайн-реклама. В отличие от традиционного маркетинга, цифровой маркетинг осуществляется исключительно в режиме онлайн и дает возможность оперативно отслеживать поведение целевой аудитории и корректировать стратегию продвижения в режиме реального времени [9].

Ключевые инструменты цифрового маркетинга включают поисковую оптимизацию (SEO), контекстную рекламу (PPC), маркетинг в социальных сетях (SMM), e-mail-маркетинг, а также использование аналитики и big data. Эти инструменты обеспечивают точное таргетирование, персонализацию и повышают вовлеченность аудитории.

Анализ основных каналов диджитал-маркетинга территорий представлен в таблице.

В результате анализа, приведенного в таблице, авторы пришли к выводу, что наиболее эффективным решением для продвижения регионов в цифровом пространстве является комбинация всех вышеперечисленных инструментов, так как все они имеют различное действие и оказывают наилучший эффект в комбинации друг с другом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно выделить три модели продвижения: через развитие туристического бренда (например, Татарстан), через цифровизацию городской среды (например, Москва), через акцент на природные ресурсы и экологию (например, Приморский край).

Формирование и продвижение территориального бренда во многом зависит от так называемой айдентики — корпоративной идентификации, визуального формата и узнаваемости бренда.

Например, Тюмень представила айдентику, основанную на концепции «исторического градиента». Логотип в виде дощаника, вписанного в геральди-

Анализ основных каналов цифрового маркетинга для продвижения регионов

Analysis of the main digital marketing channels used to promote places

Наименование канала или инструмента продвижения Promotion channel or tool	Краткая характеристика Brief description	Достоинства Strengths	Недостатки Weaknesses
Официальные сайты и платформы регионов Official websites and platforms of places	Официальные сайты субъектов Российской Федерации выполняют функции информационных и имиджевых платформ. Они содержат сведения о социально-экономическом развитии, инвестиционных возможностях, культурных мероприятиях и туристических маршрутах Official websites of subjects of the Russian Federation serve as information and image building platforms. They offer information about socio-economic development, investment opportunities, cultural events and travel itineraries	Разработка современного, удобного и адаптивного сайта позволяет повысить доверие к региону. Наличие многоязычной версии сайта и инструментов обратной связи значительно повышает доступность региона для внешних пользователей. Подходит как для B2C, так и для B2B The development of a modern, user-friendly and adaptive website makes places more trustworthy. A multi-language website and feedback tools greatly improve the accessibility of places for external users. Good both for B2C and B2B	Не является универсальным каналом, так как имеет низкую востребованность среди молодого населения, которое предпочитает более современные каналы This channel is not universal, as it is hardly popular among young users preferring more advanced channels

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Наименование канала или инструмента продвижения Promotion channel or tool	Краткая характеристика Brief description	Достоинства Strengths	Недостатки Weaknesses
Маркетинг в социальных сетях (SMM) Social Media Marketing (SMM)	<p>Социальные сети стали неотъемлемой частью цифровой коммуникации. Для территориального маркетинга они выполняют функции информирования, вовлечения и обратной связи.</p> <p>В данном случае есть два пути: качественное ведение официальных страниц регионов/регионального продукта или продвижение с помощью контекстной рекламы или через агентов влияния (так называемых «инфлюенсеров»)</p> <p>Social networks are an integral part of digital communication. In place marketing, they serve as instruments for information distribution, engagement and feedback.</p> <p>Two options are available in this case: high-quality management of official pages of places/local products or promotion through contextual advertising or agents of influence (so-called “influencers”)</p>	<p>Высокая вовлеченность как среди молодежи, так и среди лиц среднего и старшего возраста. Такие платформы, как ВКонтакте, Telegram, Одноклассники и Rutube позволяют транслировать визуальный контент, подчеркивая уникальные особенности региона. Например, здесь можно разместить виртуальные туры по достопримечательностям, интерактивные карты с маршрутами и тематическими зонами, которые позволяют создать эффект присутствия. Бренд-видео становятся мощным средством продвижения. Они формируют эмоциональный образ территории, подчеркивают ее уникальность и транслируют ценности. Качественный видеоконтент способствует вирусному распространению информации и охвату широкой аудитории. Контекстная реклама на платформах, например, таких, как Яндекс и многих других позволяет показывать сообщения пользователям, уже проявившим интерес к теме региона. Это делает рекламную кампанию более эффективной, снижая затраты и повышая конверсию. Таргетированная реклама в социальных сетях предоставляет возможность сегментировать аудиторию по возрасту, интересам, географии и другим параметрам. Подходит как для B2C, так и для B2B</p> <p>High involvement of young people, and middle-aged and older users.</p> <p>Such platforms as VKontakte, Telegram, Odnoklassniki and Rutube broadcast videos, emphasizing the unique features of a place. For example, virtual tours of landmarks, interactive maps showing itineraries and thematic zones can be made available here to imitate the participation effect. Brand videos are a powerful means of promotion. They create an emotional image of a place, emphasize its uniqueness, and convey values. High-quality videos contribute to the viral spread of information and ensure access to large audiences. Contextual advertising on such platforms as Yandex and many others shows messages to those users who already take interest in the place. This makes the promotion campaign more effective, cuts costs and boosts conversion. Targeted advertising in social networks breaks down the audience by age, interests, location, and other parameters. Good both for B2C and B2B</p>	<p>В перегруженном информационном пространстве очень сложно получить внимание потребителей. Это приводит к тому, что люди готовы воспринимать предложения компаний только в том случае, если они соответствуют интересам и запросам<sup>9</sup>. Возможность оперативно реагировать на запросы аудитории, устранять репутационные риски и выстраивать диалог с разными группами населения.</p> <p>Возможна реализация кампаний с участием лидеров мнений, что усиливает доверие к информационному сообщению</p> <p>It is hard to capture the attention of consumers in an information-intensive space. Hence, users are ready to perceive corporate offers only if they fit their interests and requests<sup>9</sup>. It ensures the ability to quickly respond to requests, eliminate reputational risks and start dialogues with different groups of the population. Campaigns can have opinion leaders involved to build confidence in information messages.</p>
E-mail-маркетинг E-mail marketing	<p>Является удобным инструментом интернет-маркетинга и представляет собой персонализированную рассылку писем пользователям, которые дали свое согласие на получение этой рассылки. Задача маркетологов здесь — превратить холодного «лида» (пользователя, который заинтересован в предложении, но пока не планирует приобретение продукта, в нашем случае территориального) в реального покупателя/пользователя территориального продукта</p> <p>This convenient Internet marketing tool means personalized posting of letters to users who agree to receive mail.</p> <p>The task of marketers is to convert a cold “lead” (a user who is interested in an offer, but does not plan to purchase the product) into a real buyer/user</p>	<p>Зачастую в базу попадают контакты людей, которые оставили их сами и не против рассылок — тогда лояльность к почтовой рассылке выше и вероятность отклика больше. Высокая надежность источника информации в случае, если отправитель — официальный представитель. Однако в настоящее время участились случаи мошеннических и спам-рассылок. Подходит как для B2C, так и для B2B</p> <p>The database often has contacts of users who voluntarily provide them and who agree to receive mail; hence, loyalty to mail is higher and the likelihood of a response is higher, as well. Highly reliable information sources, if the sender is an official representative.</p> <p>However, at present, cases of fraudulent and spam mailings are frequent.</p> <p>Good for both B2C and B2B</p>	<p>Частая негативная реакция из-за назойливости, засорения почтовых ящиков получателей, спам-рассылок. Трудно назначать «свидания» потребителям, если компания не знает, как с ними связаться</p> <p>Negative feedbacks are frequent due to importunity, clogged mailboxes, and spam mailings. It is difficult to have “a date” with a consumer if the company does not know how to contact him/her</p>

<sup>9</sup> Что такое диджитал-маркетинг? Про основы, принципы и технологии. URL: <https://marketing.hse.ru/blog/chto-takoe-didzhital-marketing/>

Окончание табл. / End of the Table

Наименование канала или инструмента продвижения Promotion channel or tool	Краткая характеристика Brief description	Достоинства Strengths	Недостатки Weaknesses
Поисковая оптимизация (SEO) Search Engine Optimization (SEO)	Представляет собой продвижение сайтов, выдачу сайтов в поисковых сервисах, таких как Яндекс, Google и т.д. с целью увеличения посещаемости It is the promotion of websites, the dropout of websites by such search engines as Yandex, Google, etc. to boost traffic	Эффективный инструмент для увеличения посещаемости сайтов регионов. Невысокая стоимость. Подходит для B2C An effective tool used to boost traffic to local websites. Low cost. Good for B2C	Занимает много времени и дает накопительный эффект — отсутствие быстрых результатов. Зачастую оказывается неэффективным для B2B It is time consuming and has a cumulative effect: no quick results. It is often ineffective for B2B
Таргетированная реклама Targeted Advertising	Это реклама, которая показывается только пользователям с заданными характеристиками, например: женщинам и мужчинам из Москвы в возрасте 25–35 лет This advertising is only shown to users with pre-set characteristics, for example: women and men based in Moscow and aged 25–35	Высокая доступность ввиду невысокой стоимости. Быстрые результаты. Возможность настроить рекламу только на нужную целевую аудиторию. Возможность получить подробную аналитику по проведенным рекламным мероприятиям: сервисы по настройке рекламы предоставляют статистику, по которой можно понять, какое объявление было максимально эффективным, какая аудитория реагировала лучше всего <sup>10</sup> . Подходит для B2C High availability due to low cost. Fast results. The ability to customize advertising only for the pre-set target audience. The availability of detailed analysis of promotion events: ad customizing services provide statistics showing the most effective ads and the most responsive audience <sup>10</sup> . Good for B2C	Главным минусом является то, что такая реклама нацелена на так называемых «холодных» пользователей, у которых еще нет спроса на продукт, поэтому она может быть менее эффективна. Зачастую оказывается неэффективной для B2B The main disadvantage is that such advertising is aimed at so-called “cold” users who do not yet have demand for the product, so it can be less effective. It is often ineffective for B2B
Контекстная реклама Contextual Advertising	Данный вид рекламы является видом таргетированной рекламы, но с одним важным отличием — данная реклама показывается только тем пользователям, которые ранее интересовались продуктом. Например, пользователь, искавший билеты на самолет в Сочи, увидит рекламное предложение о скидках в отеле в г. Сочи This is targeted advertising, but it has one important distinguishing feature: this advertising is shown only to those users who took interest in some product in the past. For example, a user who looked for plane tickets to Sochi can see an ad offering discounts at a Sochi hotel	Этот вид рекламы имеет те же достоинства, что и таргетированная реклама, и является более эффективным инструментом цифрового маркетинга, так как рекламное предложение получают «теплые» клиенты. Подходит для B2C This type of advertising has the same strengths as targeted advertising. Moreover, it is a much more effective digital marketing tool, since this ad is received by “warm” clients. Good for B2C	Не подходит для новых товаров или услуг, которые находятся как бы «вне контекста». Зачастую оказывается неэффективным для B2B It is not good for new products or services that are “out of context”. It is often ineffective for B2B

ческий щит, отсылает к речному прошлому города. Ижевск разработал «индустриальный» шрифт, подчеркивающий его статус как центра оружейной промышленности. Айдентика включает строгие геометрические формы и монохромную палитру, символизируя технологичность и силу. Логотипы и визуальные элементы используются в городской навигации и официальных документах, создавая единый визуальный стиль. Никель, небольшой поселок на границе с Норвегией, создал дружелюбного и узнаваемого маскота — персонажа, отражающего экологические инициативы и стремление к устойчивому развитию. Айдентика включает яркие цвета и простые формы, привлекающие внимание как местных жителей, так и туристов. Маскот используется в со-

циальных сетях и на мероприятиях, способствуя формированию позитивного имиджа поселка<sup>11</sup>.

Москва — лидер по применению цифровых решений. В столице успешно функционирует единая цифровая платформа «Активный гражданин», которая позволяет жителям участвовать в жизни города. Также работает туристический портал Discover Moscow<sup>12</sup>, который привлекает внимание как россиян, так и иностранных гостей. Данный проект ориентирован на цифровое продвижение культурного, исторического и событийного потенциала столицы. Портал стал инструментом городского маркетинга и каналом продвижения локального контента.

<sup>11</sup> Way to Russia. 6 российских городов с новой айдентикой. URL: <https://skillbox.ru/media/design/city-brand/>  
<sup>12</sup> Официальный сайт Discover Moscow. URL: <https://discover.moscow/ru>

<sup>10</sup> Таргетированная реклама. URL: <https://www.unisender.com/ru/glossary/chto-takoe-targetirovannaya-reklama/#anchor-1>



Преимуществом служит высокая степень интеграции с городскими сервисами и использование AR/VR-технологий. Кроме того, преимуществом также является наличие многослойной навигации и визуально проработанный, интуитивно понятный интерфейс. Проект активно применяет интерактивные карты, виртуальные экскурсии и гиды. Среди недостатков можно выделить фокус только на российскую и московскую аудиторию и ограниченное многоязычие, что снижает привлекательность для иностранных туристов.

Эффект выражается в росте числа самостоятельных туристов и повышении цифровой вовлеченности пользователей.

Республика Татарстан также демонстрирует эффективный подход к территориальному брендингу. Регион активно продвигает туристический и инвестиционный потенциал через цифровые каналы. Официальный сайт Visit Tatarstan<sup>13</sup> содержит мультимедийные материалы, подробные маршруты и инструменты для взаимодействия с туристами. Данный проект представляет собой региональный туристический бренд с узнаваемой айдентикой. Преимущество заключается в едином визуальном стиле и активном продвижении через соцсети, а также интеграции культурного наследия и современной инфраструктуры региона. Проект демонстрирует продуманную работу с целевыми аудиториями и так называемый маркетинг впечатлений. Среди недостатков можно выделить ограниченное распространение информации за пределами СНГ, а также зависимость от локальных мероприятий как основного источника трафика. Эффект проекта выражается в формировании позитивного имиджа региона и росте туристического потока. Visit Tatarstan стал примером эффективного территориального брендинга и межведомственного взаимодействия. Казань активно продвигает себя как третью столицу России с акцентом на сочетание татарских и русских традиций, исламской и православной культур. Бренд города строится вокруг идеи мультикультурности, гостеприимства и современного динамичного развития. Визуальная айдентика Казани включает национальные орнаменты, лаконичную типографику и символику, связанную с историческими и спортивными достижениями.

Санкт-Петербург развивает бренд «культурной столицы» с упором на архитектурное наследие, музеи и театры. Город использует в цифровом маркетинге визуальные образы Невы, белых ночей и классической архитектуры. Внешняя коммуникация подчеркивает интеллигентность, элегантность и европейский облик города, что делает его привлекательным для туристов, инвесторов и участников международных событий.

<sup>13</sup> Официальный сайт Visit Tatarstan. URL: <https://visit-tatarstan.com/>

<sup>14</sup> Официальный сайт VisitRussia. URL: <https://www.visitrussia.com/>

Внимания заслуживает и широко известный проект VisitRussia<sup>14</sup> — это национальная инициатива по продвижению туристического потенциала России на международной арене. Он был запущен Федеральным агентством по туризму в сотрудничестве с профильными организациями. Основная цель проекта — формирование привлекательного имиджа страны и увеличение въездного туризма.

В рамках VisitRussia созданы мультязычные онлайн-платформы, где представлена информация о культурных объектах, маршрутах и туристической инфраструктуре. Используются визуальные форматы: видео, фото, виртуальные туры. Кроме того, VisitRussia создавался как национальная платформа для международного продвижения туризма, поэтому проект активно сотрудничает с зарубежными туристическими операторами. Сильная сторона — координация с региональными органами и экспортная направленность. К недостаткам относится фрагментарное обновление контента и слабая интерактивность, также недостаточно проработана персонализация предложений и обратная связь с пользователями.

В рамках проекта проводится аналитика предпочтений туристов и оценка эффективности инструментов цифрового маркетинга. Продвижение осуществляется через социальные сети, рекламные кампании и международные выставки [10, 11].

Эффект заключается в формировании единого имиджа России как туристической страны. VisitRussia способствует росту узнаваемости направлений и развитию въездного туризма.

Инициатива стала примером координированной работы государства и бизнеса в продвижении территориального бренда. Благодаря проекту возрос интерес к регионам России, которые ранее не имели высокого туристического трафика. В результате VisitRussia демонстрирует, как цифровой маркетинг может выступать инструментом формирования позитивного образа страны и повышения ее привлекательности на глобальном уровне.

Примечательно, что иногда бренд города формируется «стихийно», в результате исторического стечения обстоятельств, без каких-либо специальных усилий заинтересованных сторон (стейкхолдеров). Однако это больше исключение, чем правило. Например, образ Санкт-Петербурга как достояния Российской империи и Советского Союза и культурной столицы сложился исторически. Впервые культурной столицей этот город назвал первый Президент РФ Борис Ельцин. Данное выражение стало крылатым и закрепилось как одно из обозначений Санкт-Петербурга [12, 13].

Сравнение российских и зарубежных кейсов выявляет различия в степени зрелости цифровых стратегий [14]. Зарубежные практики более структурированы и опираются на устойчивые бренды, которые развиваются в течение десятилетий. У них чаще используются технологии big data, пользовательская

аналитика и эмоциональный брендинг. Различия заключается также в подходах к управлению. Зарубежные примеры демонстрируют тесное взаимодействие органов власти с частным сектором и креативными индустриями [15]. В России такой формат сотрудничества только начинает формироваться.

Кроме того, ограниченные финансовые ресурсы, кадровые дефициты в сфере цифрового маркетинга, отсутствие яркого регионального бренда, недостаточная проработка каналов коммуникации и многие другие ограничения также затрудняют работу отечественных специалистов в сфере территориального маркетинга [16, 17]. Еще одна потенциальная проблема для многих регионов — отсутствие технологической оснащенности, сравнительный анализ показывает, что эффективность цифровых инструментов зависит от степени развития инфраструктуры и уровня цифровой грамотности региональных команд.

Тем не менее в последние годы в российских регионах наблюдается значительный прогресс, но внедрение цифрового маркетинга носит фрагментарный характер. Отсутствие единой стратегии и бренда региона снижает эффективность продвижения. Регионы-лидеры, такие как Москва и Татарстан, приближаются по уровню развития к европейским стандартам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территориальный брендинг — это «лицо региона». Это ассоциации, которые возникают в головах у жителей и туристов при упоминании названия города. Это совокупность инфраструктуры, достопримечательностей, мероприятий, традиций и множества других параметров<sup>15</sup>.

Исследование показало, что цифровые инструменты позволяют расширить охват, повысить вовлеченность и обеспечить устойчивый интерес к региону. Использование официальных сайтов, социальных сетей, таргетированной рекламы, а также визуальных форматов (видео, виртуальные туры, интерактивные карты) помогает создавать многомерное представление о территории, что особенно важно в условиях высокой конкуренции между регионами как за туристов, так и за инвестиции [18].

Анализ практик российских регионов подтверждает эффективность комплексного подхода. Проекты Москвы, Казани и Татарстана демонстрируют активное применение цифровых решений, формирование единой айдентики и активное вовлечение населения.

Однако развитие цифрового маркетинга в регионах сталкивается с рядом ограничений. Это нехватка финансирования, кадровый дефицит, отсутствие квалифицированных специалистов, а также слабая

цифровая грамотность некоторых представителей региональных администраций. Отдельной проблемой является недостаточно проработанный или отсутствующий территориальный бренд. Без четкой идентичности продвижение становится разрозненным и неустойчивым [19].

Для преодоления этих ограничений необходимо комплексное взаимодействие государства и бизнеса. Государство должно формировать инфраструктурные условия, развивать платформенные решения и оказывать методическую поддержку регионам. Бизнес, в свою очередь, способен обеспечить технологическую реализацию, креативные подходы и аналитическую экспертизу [20].

Особую значимость имеет развитие партнерства между регионами и IT-компаниями. Такие взаимодействия дают возможность внедрять современные технологии, использовать аналитику и big data, адаптировать подходы к продвижению. Кроме того, важно развивать компетенции региональных специалистов, внедрять системы повышения квалификации, проводить обучение цифровому управлению брендом территории.

В целом можно сказать, что эффект от цифровых маркетинговых проектов проявляется в усилении туристической привлекательности регионов, увеличении внутреннего и въездного турпотока. Рост туристического потока ведет к расширению потребления местных товаров и услуг. Экономическая активность усиливается за счет роста малого и среднего бизнеса в сфере туризма. Повышается занятость населения в сопутствующих секторах экономики.

Цифровые платформы способствуют более эффективному использованию регионального культурного потенциала. Формируется узнаваемый имидж территорий, усиливающий их конкурентные позиции. Происходит активизация инвестиций в инфраструктуру и туристические объекты.

Развитие цифровых сервисов улучшает доступ к информации и удобство путешествий. Повышается лояльность потребителей и вовлеченность целевых аудиторий. Регионы получают возможность точно продвигать уникальные предложения. Также улучшается координация между государством, бизнесом и обществом.

Помимо этого, методы цифрового маркетинга способствуют интеграции территорий в глобальное информационное пространство. Это создает предпосылки для устойчивого социально-экономического развития регионов.

Таким образом, можно сказать, что цифровой маркетинг выступает инструментом системной трансформации региональной экономики.

<sup>15</sup> «У Новосибирска нет лица»: что такое бренд города и зачем он нужен. URL: <https://nsk.dk.ru/news/237183050>

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кондрашова О.В., Кублин И.М., Воронцов А.А., Орлов П.В. Трансформация маркетинга в цифровой среде // Практический маркетинг. 2023. № 8 (314). С. 22–27. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-8314-22-27. EDN HOUUEC.
2. Dašić D., Vučić V., Turčinović Ž., Tošić M. Digital marketing — marketing opportunities and the power of digital consumers // Economics of Agriculture. 2023. Vol. 70. No. 4. Pp. 1187–1199. DOI: 10.59267/ekopolj-23041187d. EDN OMTEBG.
3. Yahyokhanov N.B. Trends in digital marketing in Uzbekistan // Journal of Marketing, Business and Management. 2024. Vol. 3. Issue 2.
4. Narkulova Sh.Sh. Modern digital marketing in Uzbekistan // Экономика и социум. 2023. No. 5–2 (108). Pp. 230–232. EDN JOMRWV.
5. Голдыбаев Д.И. Эволюция цифрового маркетинга и его роли в управлении бизнесом // Практический маркетинг. 2023. № 4 (310). С. 36–41. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-4310-36-41. EDN JUHFVN.
6. Шевченко Д.А. Цифровой маркетинг: обзор каналов и инструментов // Практический маркетинг. 2019. № 10 (272). С. 29–37. EDN SJYXKR.
7. Тен Ю.П., Гайко Е.Б. Трансформация концепции брендинга в цифровом маркетинге // Проблемы экономики и юридической практики. 2024. Т. 20. № 6. С. 203–207. DOI: 10.33693/2541-8025-2024-20-6-203-207. EDN LMPREV.
8. Егорова О.А. Факторы эффективности видеорекламы в цифровом маркетинге // Практический маркетинг. 2023. № 7 (313). С. 35–40. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-7313-35-40. EDN BHMJYR.
9. Jayashree R., Sree Vignesh, Kasirajan A., Santhoshsivan S., Saba Yasar. An study of different kinds of channels in digital marketing // Russian Law Journal. 2023. Vol. 11. No. 11s. DOI: 10.52783/rj.v11i11s.1869. EDN PDAEJY.
10. Соболева Ю.П., Орлов А.П. Роль цифрового маркетинга в формировании отношений с потребителями // Вестник Академии знаний. 2024. № 3 (62). С. 380–384. EDN VUFBCW.
11. Boyjigitov S.K.O. Improving the efficiency of marketing service by effective use of digital marketing opportunities // Journal of Marketing, Business and Management. 2023. Vol. 1. Issue 10.
12. Логунцова И.В., Зайцева А.С. Брендинг российских городов: обзор практики региональных «столиц» РФ // Государственное управление. Электронный вестник. 2024. № 103. С. 164–176. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-103-2024-164-176. EDN BKVYMU.
13. Minarova M.K. Improving the use of digital marketing in banks // European Journal of Economics and Management Sciences. 2023. No. 5–6. Pp. 31–35. DOI: 10.29013/EJEMS-23-5.6-31-35
14. Невровский А.В. Обзор взглядов на цифровой маркетинг промышленных предприятий // Вестник Академии знаний. 2024. № 3 (62). С. 863–866. EDN BJC VKD.
15. Mukhsinov B.T. Digital marketing management and business strategy // Экономика и социум. 2024. No. 5–2 (120). Pp. 462–466. EDN ESGRI.
16. Ergashev J.B. Improving the effectiveness of digital marketing in small businesses // Форум молодых ученых. 2023. No. 3 (79). Pp. 7–10. EDN GKCYLY.
17. Поляков А.М., Романишина Т.С., Бондаренко В.А. Исследование применения нейросетей в создании и продвижении кинолент в российской киноиндустрии // Практический маркетинг. 2025. № 2 (332). С. 4–10. DOI: 10.24412/2071-3762-2025-2332-4-10. EDN IBTPCG.
18. Sharipbaeva L.S.Q. The role of digital marketing in business development in Uzbekistan // Journal of Marketing, Business and Management. 2024. Vol. 3. Issue 5.
19. Stepanov M. Using digital marketing tools to optimize sales and enhance the competitiveness of small businesses in E-commerce // Universum: экономика и юриспруденция. 2025. No. 5 (127). Pp. 4–7. EDN GWFHFU.
20. Makhtibekov A. Effectiveness of multichannel marketing in the context of digital transformation // Universum: экономика и юриспруденция. 2025. No. 4–2 (126). Pp. 15–19. EDN FVWEBF.

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 10 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Айна Джумартовна Елфимова** — старший преподаватель кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7256-2553, ORCID: 0009-0004-0963-0698; elfimovaad@mgsu.ru;

**Ферида Гаджиевна Малиева** — кандидат экономических наук, доцент, профессор, доцент кафедры экономической безопасности, финансов и бухгалтерского учета; **Российский университет кооперации**; 141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 14; SPIN-код: 8370-6255, ORCID: 0000-0001-5581-2696; fmalieva@ruc.su;



Дилдора Джабборхоновна Пашаходжаева — кандидат философских наук, доцент, доцент кафедры бухгалтерского учета; Самаркандский институт экономики и сервиса; 140100, г. Самарканд, ул. Амира Темура, д. 9, Республика Узбекистан; ORCID: 0000-0001-8015-967X; phdildora@mail.ru.

Вклад авторов:

Елфимова А.Д. — концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Малиева Ф.Г. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Пашаходжаева Д.Д. — доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kondrashova O.V., Kublin I.M., Voronov A.A., Orlov P.V. Marketing transformation in digital environment. *Practical Marketing*. 2023; 8(314):22-27. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-8314-22-27. EDN HOUUEC. (rus.).
2. Dašić D., Vučić V., Turčinović Ž., Tošić M. Digital marketing — marketing opportunities and the power of digital consumers. *Economics of Agriculture*. 2023; 70(4):1187-1199. DOI: 10.59267/ekopolj-23041187d. EDN OMTEBG.
3. Yahyokhanov N.B. Trends in digital marketing in Uzbekistan. *Journal of Marketing. Business and Management*. 2024; 3(2).
4. Narkulova Sh.Sh. Modern digital marketing in Uzbekistan. *Economy and Society*. 2023; 5-2(108):230-232. EDN JOMRWV.
5. Goldybaev D.I. Digital marketing evolution and its role in business management. *Practical Marketing*. 2023; 4(310):36-41. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-4310-36-41. EDN JUHFVN. (rus.).
6. Shevchenko D.A. Digital marketing: an overview of channels and tools. *Practical Marketing*. 2019; 10(272):29-37. EDN SJYXKR. (rus.).
7. Ten Yu.P., Gayko E.B. The transformation of the concept of branding in digital marketing. *Economic Problems and Legal Practice*. 2024; 20(6):203-207. DOI: 10.33693/2541-8025-2024-20-6-203-207. EDN LMPPEV. (rus.).
8. Egorova O.A. Factors of video advertising effectiveness in digital marketing. *Practical Marketing*. 2023; 7(313):35-40. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-7313-35-40. EDN BHMJYR. (rus.).
9. Jayashree R., Sree Vignesh, Kasirajan A., Santhosh-sivan S., Saba Yasar. An study of different kinds of channels in digital marketing. *Russian Law Journal*. 2023; 11(11s). DOI: 10.52783/rjl.v11i11s.1869. EDN PDAEJY.
10. Soboleva Yu.P., Orlov A.P. The role of digital marketing in shaping relationships with consumers. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024; 3(62):380-384. EDN VUFBCW. (rus.).
11. Boyjigitov S.K.O. Improving the efficiency of marketing service by effective use of digital marketing opportunities. *Journal of Marketing, Business and Management*. 2023; 1(10).
12. Loguntsova I.V., Zaytseva A.S. Branding of Russian cities: practice review of Russian federation regional “capitals”. *E-journal Public Administration*. 2024; 103:164-176. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-103-2024-164-176. EDN BKVYMU. (rus.).
13. Minarova M.K. Improving the use of digital marketing in banks. *European Journal of Economics and Management Sciences*. 2023; 5-6:31-35. DOI: 10.29013/EJEMS-23-5-6-31-35
14. Nevrovskiy A.V. Review of digital marketing approach from industrial companies. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024; 3(62):863-866. EDN BJC VKD. (rus.).
15. Mukhsinov B.T. Digital marketing management and business strategy. *Economy and Society*. 2024; 5-2(120):462-466. EDN ESVGRI.
16. Ergashev J.B. Improving the effectiveness of digital marketing in small businesses. *Forum of Young Scientists*. 2023; 3(79):7-10. EDN GKCYLY.
17. Polyakov A.M., Romanishina T.S., Bondarenko V.A. Exploring the application of neural networks in the creation and promotion of films in the Russian film industry. *Practical Marketing*. 2025; 2(332):4-10. DOI: 10.24412/2071-3762-2025-2332-4-10. EDN IBTPCG. (rus.).
18. Sharipbaeva L.S.Q. The role of digital marketing in business development in Uzbekistan. *Journal of Marketing, Business and Management*. 2024; 3(5).
19. Stepanov M. Using digital marketing tools to optimize sales and enhance the competitiveness of small businesses in E-commerce. *Univsum*. 2025; 5(127):4-7. EDN GWFHFU.
20. Makhtibekov A. Effectiveness of multichannel marketing in the context of digital transformation. *Univsum*. 2025; 4-2(126):15-19. EDN FVWEBF.

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on May 18, 2025.

Approved for publication on June 10, 2025.



**B I O N O T E S:** **Aina D. Elfimova** — senior lecturer of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7256-2553, ORCID: 0009-0004-0963-0698; elifimovaad@mgsu.ru;

**Ferida G. Malieva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Professor, Associate Professor of the Department of Economic Security, Finance and Accounting; **Russian University of Cooperation**; 14 Vera Voloshina st., Moscow Region, Mytishchi, 141014, Russian Federation; SPIN-code: 8370-6255, ORCID: 0000-0001-5581-2696; fmalieva@ruc.su;

**Dildora D. Pashakhodzhaeva** — Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Accounting; **Samarkand Institute of Economics and Service**; 9 Amir Temur st., Samarkand, 140100, Republic of Uzbekistan; ORCID: 0000-0001-8015-967X; phdildora@mail.ru.

*Authors' contribution:*

*Aina D. Elfimova — research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.*

*Ferida G. Malieva — scientific supervision, text revision, final conclusions.*

*Dildora D. Pashakhodzhaeva — text revision, final conclusions.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Строительство: тенденции, факторы и ограничения в контексте стратегических приоритетов развития страны

Ирина Алексеевна Кириченко<sup>1,2</sup>, Татьяна Николаевна Маршова<sup>1</sup>,  
Иван Николаевич Мигунов<sup>1</sup>, Ирина Борисовна Петросян<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Всероссийская академия внешней торговли Министерства экономического развития  
Российской Федерации (ВАВТ Минэкономразвития Россия); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Российско-Армянский (Славянский) университет (РАУ); г. Ереван, Республика Армения

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Темпы и направления совершенствования строительной сферы должны соответствовать стратегическим приоритетам развития страны, обеспечивать достижение результатов, установленных государственными документами стратегического планирования. Проведен анализ современного состояния и перспектив строительной отрасли России в контексте стратегических приоритетов развития страны, выявлены основные драйверы роста и факторы торможения строительства. Цель исследования — оценить способность строительной отрасли удовлетворять потребности экономики и решать стратегические задачи развития страны.

**Материалы и методы.** Исследование основано на анализе документов стратегического планирования, макроэкономических параметров и текущего состояния отрасли. В числе основных используемых методов: анализ нормативно-правовых и методических документов стратегического планирования; анализ статистических данных; сравнительный анализ; анализ хода реализации и опыта управления государственными программами и проектами; обобщение и систематизация исследуемых сведений.

**Результаты.** Строительная сфера России демонстрирует устойчивый рост, успешно реализуются национальные проекты «Жилье и городская среда», «Безопасные качественные дороги». В то же время рекордные уровни вводов, достигнутые в жилищном строительстве, сопровождаются трендом на уменьшение средней площади и комнатности квартир; сохраняется значительная дифференциация ввода как жилых, так и нежилых зданий в региональном разрезе; увеличивается объем незавершенного строительства, наблюдается тенденция снижения фондоотдачи.

**Выводы.** Выявление и комплексный анализ как внешних, так и внутренних факторов, определяющих динамику строительства и формирующих тенденции в этой сфере, позволят повысить качество стратегического планирования и выработки адекватных мер реагирования на возникающие проблемы. Интеграция таких мер в государственные проекты и программы в сфере строительства даст возможность минимизировать негативное влияние факторов и будет способствовать достижению национальных целей развития страны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительная отрасль, стратегическое планирование, государственные программы, национальные проекты, обеспечение жильем, инфраструктурные проекты

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кириченко И.А., Маршова Т.Н., Мигунов И.Н., Петросян И.Б. Строительство: тенденции, факторы и ограничения в контексте стратегических приоритетов развития страны // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1242–1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1242-1263

Автор, ответственный за переписку: Иван Николаевич Мигунов, inmig@mail.ru.

## Construction: trends, factors and constraints in the context of the country's strategic development priorities

Irina A. Kirichenko<sup>1,2</sup>, Tatyana N. Marshova<sup>1</sup>, Ivan N. Migunov<sup>1</sup>, Irina B. Petrosyan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> All-Russian Academy of Foreign Trade of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation;  
Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Russian-Armenian (Slavic) University (RAU); Yerevan, Republic of Armenia

### ABSTRACT

**Introduction.** The pace and direction of development of the construction sector should correspond to the country's strategic development priorities and ensure the achievement of results established by state strategic planning documents. The article

analyzes the current state and prospects of development of the Russian construction industry in the context of the country's strategic development priorities, identifies the main growth drivers and factors of slowing down the construction industry. The purpose of the paper is to assess the ability of the construction industry to meet the needs of the economy and solve strategic development tasks of the country.

**Materials and methods.** The research is based on the analysis of strategic planning documents, macroeconomic parameters and the current state of the industry. The main methods used are: analysis of regulatory and methodological documents of strategic planning; analysis of statistical data; comparative analysis; analysis of the implementation and management experience of state programmes and projects; generalization and systematization of the studied information.

**Results.** The Russian construction sector is showing steady growth: the volume of construction work has increased by 31 percent over the past five years, the national projects "Housing and Urban Environment", "Safe High-quality Roads" are being successfully implemented, and the groundwork for the long-term progressive development of the region has been formed. At the same time, the record levels of commissioning achieved in housing construction are accompanied by a trend towards a decrease in the average area and room capacity of apartments; significant differentiation in the commissioning of both residential and non-residential buildings in the regional context remains; the volume of construction in progress is increasing, and there is a tendency to reduce capital productivity.

**Conclusions.** Identification and comprehensive analysis of both external and internal factors that determine the dynamics of construction and shape trends in this area will improve the quality of strategic planning and develop adequate measures to respond to emerging problems. The integration of such measures into state projects and programmes in the construction sector will minimize the negative impact of factors and will contribute to the achievement of national development goals of the country.

**KEYWORDS:** construction industry, strategic planning, government programmes, national projects, housing provision, infrastructure projects

**FOR CITATION:** Kirichenko I.A., Marshova T.N., Migunov I.N., Petrosyan I.B. Construction: trends, factors and constraints in the context of the country's strategic development priorities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1242-1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1242-1263 (rus.).

Corresponding author: Ivan N. Migunov, inmig@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Строительный сектор без преувеличения можно назвать локомотивом российской экономики. Это одна из ключевых отраслей, в значительной степени определяющая уровень и динамику экономического развития страны. Строительство составляет материальную базу всех предприятий: результаты деятельности строительной отрасли — здания и сооружения различного назначения, дорожная инфраструктура, мосты и аэродромы, складские помещения и другие — создают основу производственного потенциала страны, формируют базис функционирования отраслей экономики. Строительство — драйвер экономического роста, условием которого служит расширенное воспроизводство, невозможное без дополнительных инвестиций в создание новых производственных мощностей и объектов. Строительство жилья, городской инфраструктуры, различных объектов социального назначения во многом определяют уровень жизни населения.

Большую роль играет строительство в реализации обозначенных стратегических приоритетов и национальных целей развития страны<sup>1</sup>, важным инструментарием практического исполнения которых являются государственные программы и национальные (федеральные) проекты. Повышение благополучия людей, формирование комфортной и безопасной среды для жизни, устойчивое и динамичное экономическое совершенствование, обеспечение технологического лидерства — достижение этих целей невозможно без успешно функциониру-

ющего, динамично развивающегося современного строительного комплекса.

Один из ключевых элементов государственных программ и национальных (федеральных) проектов — инвестиционно-строительные проекты, необходимые для создания материальной основы развития всех отраслей и сфер национальной экономики. В условиях действия беспрецедентного количества санкций, ограничивающих доступ отечественной строительной сферы к ряду технологий, инженерного оборудования и материалов, серьезного дефицита кадров, высокой стоимости заемного капитала, обусловленной высоким уровнем ключевой ставки Центрального банка Российской Федерации, именно ограничения со стороны строительной деятельности рассматриваются как наиболее вероятные и имеющие потенциал срыва выполнения показателей государственных программ РФ и национальных (федеральных) проектов.

Внешнеполитическая обстановка и макроэкономическая ситуация, существенным образом отражающиеся на динамике социально-экономического развития страны, формируют новые вызовы и предъявляет новые требования к строительной сфере.

Широкий комплекс современных исследований посвящен проблемам выявления важнейших факторов, оказывающих воздействие на развитие строительного комплекса, в числе которых выделяют финансовые, экономические, регуляторные, демографические, бюджетные, рыночные, процентные, технологические [1–4]. Такие факторы, как снижение темпов экономического роста, снижение инвестиций, падение доходов граждан, уменьшение доходов предприятий, снижение рентабельности

<sup>1</sup> О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309.

производственной деятельности, рост цен, изменение денежно-кредитных условий, могут влиять на уровень достижения показателей жилищной сферы, нежилого и инфраструктурного строительства [5–7]. В значительной степени определяют развитие строительного комплекса стратегические приоритеты страны и уровень государственной поддержки.

Учету возможностей и ограничений современного этапа социально-экономического развития, макроэкономических параметров и внешнеэкономического контекста, которые актуальны для выработки стратегий прогресса строительного комплекса, посвящен ряд российских и зарубежных исследований. Авторы рассматривают основные направления развития строительной отрасли [8, 9], реализацию научно-исследовательской политики и политики в области инноваций в строительстве [10–12], инвестиционную привлекательность реализации стратегических проектов и коммерциализацию строительных разработок [13].

Современная строительная отрасль переживает период существенной трансформации: активно внедряются новые строительные технологии, цифровизация трансформирует многие процессы, формируются новые форматы менеджмента. Реализация новаторских идей, внедрение современных строительных технологий и продуктов, формирование инновационных проектов позволяют снижать себестоимость и увеличивать рентабельность строительных работ, повышать эксплуатационные характеристики зданий и сооружений, их энергетическую эффективность. Для ориентации в современных направлениях совершенствования, выборе наиболее эффективных технологий и продуктов необходимо четко понимать макроэкономический контекст, стратегические приоритеты и перспективы развития страны. Формирование производственных мощностей строительного комплекса, прогресс материально-технической базы должны определяться объективными задачами по созданию и модернизации производственного аппарата страны, объемами непроизводственного, в частности инфраструктурного и жилищного, строительства, темпами развития регионов.

Цель статьи — на основе исследования документов стратегического планирования, макроэкономических параметров, анализа современного состояния и перспектив развития строительной сферы выявить основные драйверы ее роста и факторы торможения. Адекватная картина текущего состояния и перспектив строительного комплекса важна для оценки его способности удовлетворять потребности отраслей экономики и решать стоящие перед страной задачи, в частности, поддерживать высокие темпы жилищного строительства, реализовывать масштабные, современные, инновационные производственные и инфраструктурные проекты. Темпы и направления совершенствования строительной

сферы должны соответствовать стратегическим направлениям развития страны, обеспечивать достижение результатов, установленных государственными документами стратегического планирования. Учет возможностей и ограничений современного этапа социально-экономического развития, макроэкономических параметров и внешнеэкономического контекста актуален для выработки стратегий развития строительного комплекса, реализации научно-исследовательской политики и политики в области инноваций, коммерциализации разработок, реализации стратегических проектов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Среди основных методов исследования использовались анализ нормативно-правовых и методических документов стратегического планирования в контексте задач отраслей инвестиционно-строительного комплекса, анализ статистических данных и сравнительный анализ, анализ отечественного и зарубежного опыта управления реализацией государственных проектов и программ, обобщение и систематизация изучаемых сведений.

Национальные цели развития страны до 2036 г. определены Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309<sup>1</sup>. Среди них — увеличение продолжительности жизни до 81 года, развитие потенциала каждого человека, создание комфортной и безопасной среды, улучшение экологического благополучия, достижение устойчивого экономического роста, обеспечение технологической независимости и цифровая трансформация различных сфер жизни.

Ключевую роль в достижении национальных целей развития России, включая улучшение качества жизни граждан, создание комфортной городской среды и обеспечение технологической независимости страны, будет играть строительный сектор. Создание и реконструкция жилых комплексов, объектов социальной, транспортной, коммунальной и экологической инфраструктуры будут способствовать ускорению социально-экономического развития страны, повышению уровня комфорта и общего благополучия населения.

Конкретизирует стратегию достижения поставленных целей Единый план, значимая роль в котором отводится мероприятиям инвестиционно-строительной направленности (табл. 1).

Анализ приведенных параметров Единого плана показывает, что запланирована тенденция увеличения обеспеченности населения жильем: с 29,4 м<sup>2</sup> в 2024 г. до 33 м<sup>2</sup> в 2030 г.; увеличение до 120 млн м<sup>2</sup> в 2030 г. объема жилищного строительства; рост доли жилищного фонда, обновленного после 2019 г., с 11,4 % в 2024 г. до 23 % к 2030 г. Количество переселенных из аварийного фонда граждан к 2030 г. достигнет 1125 тыс. чел., что на 344 тыс. превышает показатель 2024 г. (781 тыс. чел.). К 2030 г. пла-



Табл. 1. Основные параметры Единого плана по достижению национальных целей развития Российской Федерации, характеризующие развитие инвестиционно-строительной сферы (составлено авторами по данным Единого плана<sup>2</sup>)

Table 1. The main parameters of the Unified Plan for achieving national development goals of the Russian Federation, characterizing the development of investment and construction (compiled by the authors based on data from: Unified Plan<sup>2</sup>)

Статистический индикатор Указа № 309 Statistical indicator of the Decree No. 309	2024	2025	2030	2030 в % к 2024 2030 as % of 2024
Улучшение качества среды для жизни в опорных населенных пунктах, % Improving the quality of living environment in key communities, %	–	13	30	230,8
Общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного жителя, кв. м на 1 человека Total area of residential premises per capita, sq. m per person	29,4	30	33	110,0
Доля жилищного фонда, обновленного после 2019 г., % Share of housing stock renovated after 2019, %	11,4	13,3	23	172,9
Количество граждан, переселенных из непригодного для проживания жилищного фонда (с 2019 г.), тыс. чел. Number of citizens resettled from housing stock unsuitable for habitation (since 2019), thousand people	781	789	1125	142,6
Доступность жилья на первичном рынке, % Housing availability in the primary market, %	100	101	106	105,0
Количество благоустроенных общественных территорий, ед. Number of improved public areas, units	–	5000	30 000	600,0
Количество реализованных проектов победителей Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды, ед. Number of implemented projects of the winners of the All-Russian competition of the best projects for creating a comfortable urban environment, units	–	195	1635	838,5
Численность населения, для которого улучшится качество предоставления коммунальных услуг (в сфере тепло-, водоснабжения и водоотведения), млн чел. Number of people for whom the quality of public utilities (heat, water supply and sanitation) will improve, million people	–	1,3	20	1538,5
Количество построенных и реконструированных (модернизированных) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки, шт. (с 2019 г.) Number of constructed and reconstructed (modernized) drinking water supply and water treatment facilities, pcs. (since 2019)	1413	1470	2000	136,1
Длительность инвестиционно-строительного цикла, сутки Duration of the investment and construction cycle, days	1300	1250	1000	80,0
Доля дорожной сети крупнейших городских агломераций, находящейся в нормативном состоянии, % The share of the road network of the largest urban agglomerations that is in a standard condition, %	85	85	85	100,0
Доля автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, соответствующих нормативным требованиям, % The share of regional and inter-municipal roads that meet regulatory requirements, %	54	55	60	109,1
Доля автомобильных дорог, входящих в опорную сеть, соответствующих нормативным требованиям, % The share of motorways included in the backbone network that meet regulatory requirements, %	72,7	70,5	85	120,6
Доля автомобильных дорог федерального значения, находящихся в нормативном состоянии, % The share of federal highways in normal condition, %	69,4	68,2	85	124,6
Доля зданий дошкольных образовательных организаций, в которых проведен капитальный ремонт, от общего количества зданий дошкольных образовательных организаций, % The share of buildings of preschool educational institutions in which major repairs were carried out, from the total number of buildings of preschool educational institutions, %	–	0,5	6,3	1260,0

<sup>2</sup> Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года : утв. Правительством РФ 09.01.2025.

Статистический индикатор Указа № 309 Statistical indicator of the Decree No. 309	2024	2025	2030	2030 в % к 2024 2030 as % of 2024
Доля зданий общеобразовательных организаций, в которых проведен капитальный ремонт, от общего количества зданий общеобразовательных организаций, % The share of buildings of general education organizations that have undergone major repairs, from the total number of buildings of general education organizations, %	–	9,61	21,2	220,6
Количество подключенных домовладений к сетевому природному газу в рамках программы социальной газификации населения, млн ед. Number of households connected to natural gas network within the framework of the social gasification programme, million units	0,7	0,85	1,6	188,2
Объем жилищного строительства, млн кв. м Volume of housing construction, million sq. m	90	92,8	120	129,3

нируется значительное увеличение ввода объектов коммунальной сферы, в частности, благоустроенных общественных территорий до 30 000 (по сравнению с 5000 ед. в 2024 г., т.е. рост на 600 %). За этот период численность населения, для которого доступны улучшенные коммунальные услуги, должна вырасти с 1,3 до 20 млн чел. Это свидетельствует о планируемых положительных тенденциях в улучшении инфраструктуры и повышении качества жизни населения.

Прогнозируется рост доли автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям: для дорог регионального и межмуниципального значения с 54 до 60 %; для дорог, входящих в опорную сеть, с 72,7 до 85 %; для дорог федерального значения с 69,4 до 85 %. Улучшение состояния дорожной инфраструктуры является важным фактором снижения аварийности: планируется уменьшение количества погибших в ДТП на 10 тыс. транспортных средств с 2,36 до 1,57 чел.

Рост показателей строительства объектов социальной инфраструктуры должен составить: увеличение более чем в 12 раз капитального ремон-

та дошкольных образовательных организаций, общеобразовательных организаций — примерно в 2,2 раза. Ожидается существенный рост подключений домовладений к сетевому природному газу (на 188,2 %) и создания центров воспроизведения аудиовизуального контента в малых населенных пунктах (на 2250 %).

Намечено существенное сокращение длительности инвестиционно-строительного цикла с 1250 сут. в 2025 г. до 1000 сут. в 2030 г., что свидетельствует о потенциальном ускорении инвестиционно-строительных процессов.

Параметры Единого плана детализируются в документах стратегического планирования, разрабатываемых в рамках целеполагания по отраслевому принципу. Применительно к строительной сфере прежде всего следует выделить Стратегию развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года (далее — Стратегия), основные параметры базового варианта которой представлены в табл. 2.

Табл. 2. Основные показатели развития жилищного строительства базового сценария Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства (составлено авторами по данным Стратегии<sup>3</sup>)

Table 2. Key indicators of housing construction development in the baseline scenario of the Strategy for the Development of the Construction Industry and Housing and Public Utilities (compiled by the authors based on the Strategy data<sup>3</sup>)

Наименование показателя Naming of the indicator	Годы Years				2035 г. в % к 2021 г. 2035 as % of 2021
	2021	2024	2030	2035	
Объем жилищного строительства (в год), млн м <sup>2</sup> Volume of housing construction (per year), million m <sup>2</sup>	92,6	94	120	120	129,6
Обеспеченность населения жильем*, кв. метров на чел. Housing provision*, square metres per person	27,8	29,3	33,3	36,7	132,0
Количество семей, улучшивших жилищные условия, млн семей Number of families that improved their housing conditions, million families	4,2	4,3	5,0	5,0	119,0

Примечание: \* — численность населения в 2030 и 2035 гг. определена с учетом прогноза Росстата.

Note: \* — population in 2030 and 2035 is determined taking into account the Rosstat forecast.

<sup>3</sup> Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р (ред. от 21.10.2024).

В целом ключевые параметры базового варианта Стратегии коррелируют с показателями Единого плана. Согласно базовому варианту Стратегии к 2035 г. в развитии жилищного строительства и обеспечении населения жильем планируется достижение следующих параметров: количество семей, улучшивших жилищные условия, — 5 млн семей ежегодно, объем жилищного строительства — 120 млн м<sup>2</sup> ежегодно. Обеспеченность на-

селения жильем должна возрасти к 2030 г. до 33,3 м<sup>2</sup> на человека.

Намеченные цели и индикаторы Единого плана в части обеспечения граждан жильем и объектами инфраструктуры достигаются за счет комплекса мероприятий (результатов) государственных программ Российской Федерации, федеральных<sup>4</sup> и региональных проектов, иных инструментов государственной поддержки, представленных в табл. 3.

Табл. 3. Характеристика результатов (мероприятий) основных государственных программ, направленных на обеспечение граждан жильем и объектами инфраструктуры

Table 3. Characteristics of the results (activities) of the main state programmes aimed at providing citizens with housing and infrastructure facilities

Наименование государственной программы, характеристика результатов (мероприятий) государственной программы Name of the state programme, characteristics of the results (activities) of the state programme	Характеристика инструментов государственной программы Characteristics of the instruments of the state programme
<i>Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан РФ Providing affordable and comfortable housing and utilities to citizens of the Russian Federation</i>	
Увеличение годового объема ввода жилья до 120 млн м <sup>2</sup> , улучшение жилищных условий для 5 млн семей, расселение 9,5 млн м <sup>2</sup> аварийного жилья до 2024 г., повышение комфортности городской среды в полтора раза и обеспечение качества и доступности жилищно-коммунальных услуг для не менее 50 % населения Increasing the annual volume of housing commissioning to 120 million square metres, improving housing conditions for 5 million families, resettling 9.5 million square metres of emergency housing by 2024, increasing the comfort of the urban environment by one and a half times and ensuring the quality and availability of housing and communal services for at least 50 % of the population	<ul style="list-style-type: none"><li>• финансирование выплат федеральным государственным гражданским служащим, являющимся участниками ипотечной системы обеспечения жильем;</li><li>• предоставление имущественных взносов;</li><li>• выделение субвенций на обеспечение жильем отдельных категорий граждан;</li><li>• субсидирование акционерных обществ и других организаций для возмещения недополученных доходов по кредитам, выданным на определенные цели;</li><li>• выделение субсидий бюджетам различных регионов и федеральным организациям для финансирования конкретных проектов;</li><li>• финансирование создания объектов</li><li>• financing payments to federal civil servants who are participants in the mortgage housing system;</li><li>• provision of property contributions;</li><li>• allocation of subsidies for the provision of housing to certain categories of citizens;</li><li>• subsidizing joint-stock companies and other organizations to compensate for lost income on loans issued for specific purposes;</li><li>• allocation of subsidies to the budgets of various regions and federal organizations to finance specific projects;</li><li>• financing the creation of facilities</li></ul>
<i>Развитие образования / Development of education</i>	
Модернизируется инфраструктура общего образования. Региональные программы по созданию новых мест в школах включают строительство, реконструкцию, приобретение объектов и обеспечение современными средствами обучения. Региональные программы софинансируются из федерального бюджета. Мероприятия по проектированию и строительству объектов и капитальному ремонту объектов среднего профессионального образования The general education infrastructure is being modernized. Regional programmes for creating new places in schools include construction, reconstruction, acquisition of facilities and provision of modern teaching aids. Regional programmes are co-financed from the federal budget. Activities for the design and construction of facilities and major repairs of secondary vocational education facilities	<ul style="list-style-type: none"><li>• адресное строительство (детских садов, школ), в том числе в рамках концессионных соглашений;</li><li>• субсидии на капитальные вложения;</li><li>• новые места в образовательных организациях;</li><li>• имущественные взносы (например, в международный образовательный центр);</li><li>• модернизация инфраструктуры образования</li><li>• targeted construction (kindergartens, schools), including within the framework of concession agreements;</li><li>• subsidies for capital investments;</li><li>• new places in educational organizations;</li><li>• property contributions (for example, to an international educational center);</li><li>• modernization of educational infrastructure</li></ul>

<sup>4</sup> Перечень государственных программ Российской Федерации : утв. Распоряжением Правительства РФ от 11.11.2010 № 1950-р.

Наименование государственной программы, характеристика результатов (мероприятий) государственной программы Name of the state programme, ccharacteristics of the results (activities) of the state programme	Характеристика инструментов государственной программы Characteristics of the instruments of the state programme
<i>Развитие здравоохранения / Healthcare Development</i>	
<p>Планируется создать более 3800 новых объектов, провести капитальный ремонт более 1000 медицинских организаций и поставить около 16 тыс. ед. оборудования. Особое внимание уделяется развитию первичного звена здравоохранения, включая строительство быстровозводимых и капитальных медицинских учреждений, а также модернизацию существующих объектов. Создание новых объектов, включая первичные сосудистые отделения и центры амбулаторной онкологической помощи</p> <p>It is planned to create more than 3,800 new facilities, conduct major repairs to more than 1,000 medical organizations and supply about 16 thousand units of equipment. Particular attention is paid to the development of primary healthcare, including the construction of prefabricated and permanent medical institutions, as well as the modernization of existing facilities. Creation of new facilities, including primary vascular departments and outpatient oncology care centres</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• субсидии на софинансирование капитальных вложений;</li><li>• реализация региональных проектов модернизации;</li><li>• новое строительство и реконструкция медицинских объектов;</li><li>• модернизация лабораторий и научно-производственных мощностей</li><li>• subsidies for co-financing capital investments;</li><li>• implementation of regional modernization projects;</li><li>• new construction and reconstruction of medical facilities;</li><li>• modernization of laboratories and research and production facilities</li></ul>
<i>Развитие транспортной системы / Development of the transport system</i>	
<p>До 2030 г. в России планируется создать более 300 крупных транспортных объектов в рамках национальных проектов. Среди них — Багаевский гидроузел, который увеличит грузоперевозки по р. Дон, ВСМ Москва – Санкт-Петербург с тестовым запуском в 2027 г. и основным движением в 2028 г., а также развитие Центрального транспортного узла с пассажиропотоком до 850 млн чел. к 2030 г.</p> <p>Планируется построить и реконструировать более 3,7 тыс. км автомобильных магистралей, включая свыше 1,9 тыс. км федеральных дорог, 1,7 тыс. км региональных дорог (в том числе около 900 км сельских), а также 50 обходов населенных пунктов на федеральных и региональных трассах</p> <p>By 2030, Russia plans to create more than 300 major transport facilities within the framework of national projects. Among them are the Bagaevsky hydroelectric complex, which will increase cargo transportation along the Don River, the Moscow – St. Petersburg high-speed railway with a test launch in 2027 and the main traffic in 2028, as well as the development of the Central Transport Hub with a passenger flow of up to 850 million people by 2030. It is planned to build and reconstruct more than 3.7 thousand km of highways, including over 1.9 thousand km of federal roads, 1.7 thousand km of regional roads (including about 900 km of rural roads), as well as 50 bypasses of populated areas on federal and regional highways</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• субсидирование (выделение субсидий бюджетам различных уровней и организациям);</li><li>• финансирование строительства и реконструкции (включая автомобильные дороги, железнодорожные пути, объекты в аэропортовых комплексах и другие инфраструктурные объекты);</li><li>• развитие инфраструктуры в рамках транспортных коридоров и комплексных инвестиционных проектов;</li><li>• создание объектов инфраструктуры (железнодорожной, морской, аэропортовой и др.);</li><li>• привлечение частных инвестиций через концессионные соглашения (например, для реконструкции и строительства аэропортовых комплексов в федеральной собственности)</li><li>• subsidizing (allocation of subsidies to budgets of various levels and organizations);</li><li>• financing of construction and reconstruction (including highways, railways, facilities in airport complexes and other infrastructure facilities);</li><li>• development of infrastructure within the framework of transport corridors and complex investment projects;</li><li>• creation of infrastructure facilities (railway, sea, airport and others);</li><li>• attracting private investment through concession agreements (for example, for the reconstruction and construction of airport complexes in federal ownership)</li></ul>

В целом по состоянию на начало 2025 г. мероприятия по созданию, реконструкции и модернизации объектов социальной, транспортной и иной инфраструктуры реализуются в составе 33 государственных программ и 138 федеральных и ведомственных проектов<sup>5</sup>, что свидетельствует о значительной роли строительной отрасли в достижении целевых приоритетов развития страны.

<sup>5</sup> Единый портал бюджетной системы Российской Федерации. Электронный бюджет. URL: [https:// budget.gov.ru](https://budget.gov.ru)

В табл. 4 приведены результаты оценки уровня достижения ряда показателей, запланированных в документах стратегического планирования в части строительства за 2023–2024 гг.

Анализ показывает, что большинство запланированных в рамках государственных программ и национальных проектов показателей, касающихся строительства, в 2023–2024 гг. были достигнуты. Отметим показатель средней процентной ставки по ипотечному кредиту, который оказался выше



**Табл. 4.** Уровень достижения показателей, запланированных в документах стратегического планирования в части строительства за 2023–2024 гг. (составлено по данным: паспорт государственной программы Российской Федерации<sup>6</sup>, ЕМИСС<sup>7</sup>, Федеральная служба государственной статистики, расчеты авторов)

**Table 4.** Level of achievement of indicators planned in strategic planning documents in terms of construction for 2023–2024 (compiled based on data from: passport of the state programme of the Russian Federation<sup>6</sup>, EMISS<sup>7</sup>, Federal state statistics service, authors’ calculations)

Показатель программы, ед. измерения Programme/project indicator, unit of measurement	2023			2024		
	План Plan	Факт Fact	УД*, % LA*, %	План Plan	Факт Fact	УД*, % LA*, %
Объем ипотечных жилищных кредитов (траншей) в рублях и иностранной валюте, предоставленных физическим лицам-резидентам за год, трлн руб. Volume of mortgage housing loans (tranches) in rubles and foreign currency provided to resident individuals per year, trillion rubles	4,2	7,7	183,3	4,6	4,9	106,3
Средний уровень процентной ставки по ипотечному кредиту Average mortgage interest rate	6,9	8,17	84,5	6,9	8,67	74,4
Объем жилищного строительства, млн м² в год Volume of housing construction, million m² per year	85	110,4	129,9	90	107,7	119,7
Объем ввода жилья, построенного населением Volume of housing construction, million sq. m per year	41	58,7	143,2	47	62,3	132,5
Количество семей, улучшивших жилищные условия, млн семей Number of families that improved their housing conditions, a million families	3,7	4,4	118,9	4,2	4,3	102,0
Количество граждан, расселенных из непригодного для проживания жилищного фонда (нарастающим итогом), тыс. чел. Number of citizens resettled from housing stock unsuitable for habitation (cumulative total), a thousand people	462,2	666,9	144,3	560,8	810,6	144,5
Индекс качества городской среды, баллы Urban Environment Quality Index, score	198,0	200,0	101,0	205	205	100,0
Количество построенных и реконструированных (модернизированных) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки, предусмотренных региональными программами, шт. The number of constructed and reconstructed (modernized) drinking water supply and water treatment facilities provided for by regional programmes, thing	1097	1183	107,8	1413	1474	104,3
Количество созданных новых мест в общеобразовательных организациях, в том числе расположенных в сельской местности и поселках городского типа, тыс. мест The number of new places created in general education institutions, including those located in rural areas and urban-type settlements, a thousand places	788,1	791,7	100,5	1000,5	1009,3	100,9
Количество дополнительно созданных мест с целью обеспечения дошкольным образованием детей в возрасте до 3 лет, тыс. мест, нарастающим итогом The number of additional places created to provide preschool education for children under 3 years, a thousand places of age, cumulative total	263,2	263,4	100,1	265,8	266,5	100,3
Количество созданных (реконструированных) и капитально отремонтированных объектов организаций культуры, ед. Number of created (reconstructed) and overhauled cultural facilities, unit	2612	2670	102,2	3263	3263	100,0
Протяженность построенных и реконструированных участков автомобильных дорог федерального значения, км Length of constructed and reconstructed sections of federal highways, kilometer	852,1	925,4	108,6	1305,0	1464,2	112,2

<sup>6</sup> Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» : Постановление Правительства РФ от 30.12.2017 № 1710 (ред. от 24.03.2025). URL: <https://budget.gov.ru/>

<sup>7</sup> Информацию о показателях и методике их расчета можно найти на сайте fedstat.ru в разделе «ЕМИСС». URL: <https://fedstat.ru>

Показатель программы, ед. измерения Programme/project indicator, unit of measurement	2023			2024		
	План Plan	Факт Fact	УД*, % LA*, %	План Plan	Факт Fact	УД*, % LA*, %
Количество номерного фонда, отобранного для реконструкции и создания с государственной поддержкой в форме льготного кредитования The number of rooms selected for reconstruction and creation with state support in the form of preferential lending	19,53	27,53	141,0	19,53	51,26	262,5

Примечание: \* УД — уровень достижения запланированного значения показателя.  
Note: \* LA — level of achievement of the planned value of the indicator.

запланированного, что связано с влиянием внешних для строительной сферы факторов, и прежде всего, изменением ключевой ставки Банка России.

Несмотря на достижение в 2023–2024 гг. подавляющего большинства запланированных целевых параметров, многие показатели неоднократно пересматривались в сторону снижения. Достаточно сказать, что Указом 204<sup>8</sup> были поставлены цели по достижению в 2024 г. значения ставки ипотечного кредитования менее 8 % и объемов жилищного строительства не менее 120 млн м<sup>2</sup> в год. По итогам 2021 г. многие запланированные целевые параметры жилищной сферы не достигнуты. Указом 474 от 21 июля 2020 г.<sup>9</sup> сроки достижения запланированных ранее параметров смещены до 2030 г. Соответственно, в 2022 г. были скорректированы целевые значения государственной программы «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации», национального проекта «Жилье и городская среда» и их структурных элементов. Таким образом, высокий уровень достижения показателей, характеризующих развитие сферы жилищного строительства, запланированных в рамках госу-

дарственной программы и национального проекта, ниже первоначально сформированных амбициозных планов.

Наряду с этим сегодня существуют как внешние для строительной отрасли, так и внутренние факторы и ограничения, способные оказать негативное влияние на развитие строительства и успешную реализацию намеченных в рамках документов стратегического планирования результатов, мероприятий и проектов строительного типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В числе основных тенденций, факторов развития и ограничений, определяющих функционирование строительной сферы в перспективе и влияющих на достижение стратегических целей развития страны, необходимо выделить следующие.

Несмотря на сложности и ограничения строительная отрасль в последние годы демонстрирует стабильный рост и продолжает оставаться одним из драйверов развития экономики нашей страны. Объем строительных работ за последние пять лет вырос на 31 %, в 2024 г. прирост составил 2,1 %. Успешно реализуются национальные проекты «Жилье и городская среда», «Безопасные качественные дороги», сформированы заделы для перспективного поступательного развития. Динамика ключевых макроэкономических показателей вида деятельности «Строительство» приведена в табл. 5.

Табл. 5. Основные показатели, характеризующие вид экономической деятельности «Строительство» (источники: Росстат, ЕМИСС, расчеты авторов)

Table 5. Key indicators characterizing the type of economic activity “Construction” (sources: Rosstat, EMISS, authors’ calculations)

Наименование показателя Naming of the indicator	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Объем работ: Volume of work:							
• в фактически действовавших ценах, млрд руб.; in actual prices, billion rubles;	4454,2	7010,4	9686,3	11 047,9	13 149,4	15 092,3	16 780,1
• в постоянных ценах, в % к предыдущему году in constant prices, as a percentage of the previous year	105,0	96,1	102,1	107,0	107,5	107,9	102,1

Окончание табл. 5 / End of the Table 5

Наименование показателя Naming of the indicator	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Валовая добавленная стоимость строительства: Gross added value of construction:							
• в текущих основных ценах, млрд руб.; in current basic prices, billion rubles;	2587,8	4722,3	5278,0	5849,8	7045,5	8084,7	8923,9
• в постоянных ценах, в % к предыдущему году; in constant prices, as a percentage of the previous year;	104,4	98,0	96,6	105,7	106,7	109,5	104,2
• удельный вес в ВВП, % share in GDP, percent	6,5	6,3	5,4	4,8	5,0	5,1	4,9
Среднесписочная численность работников в строительстве, тыс. чел.: Average number of employees in construction thousand people:	3061,9	2619,0	2304,1	2313,1	2353,2	2397,4	2400,6
• в % к предыдущему году; as a percentage of the previous year;	100,9	95,8	97,5	100,4	101,7	101,9	100,1
• удельный вес в общей численности занятых, % proportion in the total number of employed, percent	6,6	5,8	5,3	5,4	5,5	5,6	5,6
Инвестиции в основной капитал строительных организаций: Investments in fixed capital of construction organizations:							
• в фактически действовавших ценах, млрд руб.; in actual prices, billion rubles;	342,1	401,2	745,8	907,1	1226,0	1435,9	—
• в сопоставимых ценах, в % к предыдущему году; in comparable prices, as a percentage of the previous year;	110,9	77,7	103,9	114,0	120,1	109,7	—
• удельный вес в общем объеме инвестиций в основной капитал, % share in the total volume of investments in fixed capital, percent	3,7	2,9	3,7	3,9	4,3	4,2	—
Наличие основных фондов: Availability of fixed assets:							
• по полной учетной стоимости, на конец года, млрд руб.; at full book value; at the end of the year, billion rubles;	1499,9	2049,4	2934,5	3404,6	3760,0	3952,0	—
• в постоянных ценах, в % к предыдущему году; at constant prices, as a percentage of the previous year;	101,8	102,5	105,6	109,3	109,8	—	—
• удельный вес в общей стоимости основных фондов, % share in the total value of fixed assets, percent	1,6	1,3	0,8	0,9	0,9	0,9	—
Рентабельность, % Profitability, %	—	3,8	4,2	5,1	6,2	8,0	—
Удельный вес убыточных организаций, % The share of unprofitable organizations, %	29,4	27,6	27,0	25,172	23,5	22,0	21,6

На строительную отрасль приходится порядка 5–6 % создаваемой в народном хозяйстве валовой добавленной стоимости (ВДС). Косвенный вклад строительного сектора в экономику страны, обусловленный наличием значительных мультипликативных эффектов, еще больше. Строительство является значимым потребителем трудовых ресурсов: в нем занято около 9 % от общего количества занятых в стране, т.е. порядка 6,5 млн чел. Строительство — крупный потребитель продукции машиностроения, промышленности стройматериала-

лов, химической промышленности, транспортной отрасли. Со строительством тесно связан и банковский сектор, формирующий спрос на жилье путем ипотеки, кредитующий малый и крупный бизнес, в том числе на цели расширения производственной деятельности. Динамика объема работ, выполненных по виду экономической деятельности «Строительство», в сравнении с динамикой основных макроэкономических показателей — ВВП и инвестициями в основной капитал, показана на рис. 1. При увеличении за пятилетие 2019–2023 гг. объема



**Рис. 1.** Динамика ВВП, инвестиций в основной капитал и объема работ по виду деятельности «Строительство» в 2001–2024 гг., %, 2000 г. = 100 %

**Fig. 1.** Dynamics of GDP, investments in fixed capital and volume of work by type of activity “Construction” in 2001–2024, %, 2000 = 100 %

строительных работ на 27,9 % прирост ВВП составил 8,1 %, что говорит об интенсификации строительных процессов в экономике, обусловленной возросшим спросом на строительную продукцию.

Анализируя динамику строительных работ, следует отметить, что в 2022 г. их объем впервые за весь постсоветский период превысил уровень 1990 г., составив 101,2 % от этого уровня. За период 2000–2022 г. физический объем строительных работ увеличился в 2,8 раза. В зоне отрицательных значений индекс физического объема находился в кризисном 2009 г., а также в период 2014–2017 г., за который суммарное падение объема строительства составило 9,1 %. В 2018–2023 гг. среднегодовой объем прироста строительства составил 5,3 %. Продemonстрированная положительная динамика строительного сектора явилась одним из важных факторов устойчивости российской экономики в условиях воздействия санкционного давления.

В сфере жилищного строительства непрерывный рост с 2018 г. объемов вводимых в действие жилых домов привел к рекордным уровням 110,1 и 107,7 млн м<sup>2</sup> в 2023–2024 гг. В то же время необходимо отметить определенные проблемы современного рынка жилья: с начала текущего года наблюдается снижение: на 23 % запуска новых проектов, на 18 % — объемов ввода многоквартирного жилья, на 53 % — выдачи ипотеки. Такая тенденция может привести к дефициту жилья в 2027–2028 гг. и росту цен на него.

Большой вклад в прирост ввода жилья в последние годы дает индивидуальное жилищное строительство (ИЖС), на рост которого влияло стремление людей после пандемии обзавестись индивидуальным жильем, увеличение возможности финансировать строительства за счет ипотеки, социальная газификация. В 2024 г. объем ИЖС составил 62,3 млн м<sup>2</sup>, что также является наибольшим значением с начала

1990-х гг. Увеличение доли ИЖС в объеме вводимого жилья наряду с такими позитивными факторами, как увеличение внебюджетного финансирования, большее соответствие параметров жилья потребностям населения, содержит и определенные риски и угрозы. В их числе и распространение нерыночных методов строительства, и расширение неформального сектора, снижение производительности труда [14].

В части многоэтажного жилищного строительства тенденция увеличения ежегодных вводов как жилой площади, так и количества построенных квартир сопровождалась трендом на уменьшение средней площади квартир: если в начале 2000-х гг. средняя площадь квартиры составляла 80–85 м<sup>2</sup>, то к 2015–2020 гг. она снизилась до 70 м<sup>2</sup>. В 2021–2024 гг. вновь появилась тенденция к некоторому увеличению средней площади квартир, которая составила 77–80 м<sup>2</sup>. Отметим, что это практически самый низкий уровень среди постсоветских стран. Так, в Белоруссии, Республике Молдова этот показатель составлял в 2021 г. 84–85 м<sup>2</sup>; в Венгрии, Польше, Хорватии, Болгарии, Румынии — 90–100 м<sup>2</sup>; в Чехии, Литве, Киргизии, Таджикистане, Казахстане — 100–115 м<sup>2</sup>; в Латвии, Азербайджане, Армении — 125–130 м<sup>2</sup>.

Наряду с этим наблюдались сдвиги и в структуре вводимого жилья по количеству комнат в квартирах: с начала 2000-х гг. в два раза увеличилась доля однокомнатных квартир (с 20 до 40–46 %) при стабильной доле двухкомнатных (29–30 %) и сокращении доли трехкомнатных и более квартир (с 50 и более % до 26–27 %).

Указанные тенденции отражают экономические реалии (рост цен, снижение доходов населения, дорогие кредиты позволяют реализовывать потребность граждан в жилье путем приобретения квартир небольшой площади/комнатности), но не соответствуют повышающимся требованиям к качеству жи-



ля и стратегической цели по улучшению качества жизни граждан, важнейшим компонентом которого являются жилищные условия.

Сохраняется значительная дифференциация ввода жилья в региональном разрезе. Более половины вводов приходится на два федеральных округа — Центральный и Приволжский, при этом наблюдается тенденция снижения этой доли: если в 2000 г. она составляла 57 %, то в 2022 г. 50 %. На 2–3 п.п. увеличился удельный вес вводов жилья в Северо-Западном, Южном, Северо-Кавказском федеральных округах. Около 10 % вводов приходится на города Москву и Санкт-Петербург. Удельный вес Москвы снизился с 11–12 % в начале 2000-х гг. до 3–4 % в 2010–2018 гг. и вновь вырос до 6–7 % в 2019–2022 гг. На региональные темпы жилищного строительства, наряду с макроэкономическими параметрами, влияет система управления и регулирования на региональном уровне [15], создание условий для развития жилищного строительства в регионе [16]. В числе топ-10 регионов по вводу жилья, на которые приходится более половины общероссийского объема ввода: Москва и Санкт-Петербург, Московская и Ленинградская области, Краснодарский край, Тюменская, Свердловская, Ростовская области, Республики Татарстан и Башкортостан.

Таким образом, несмотря на в целом позитивную динамику и рекордные объемы вводов, ряд тенденций в сфере жилищного строительства не соответствует стратегическим задачам по повышению уровня жизни, улучшению жилищных условий, росту доступности жилья, уменьшению региональной дифференциации. Выявление факторов, определяющих динамику жилищного строительства и формирующих тенденции в этой сфере, позволит повысить качество стратегического планирования и выработки адекватных мер реагирования на возникающие проблемы.

Прирост объемов зданий нежилого назначения был меньше и составил за пятилетие 2018–2023 гг. 15,6 %. По итогам 2023 г. площадь возведенных зданий нежилого назначения вышла на уровень 35,7 млн м<sup>2</sup>.

Одним из важнейших сегментов является промышленное строительство, создающее основу производственного потенциала страны. Среди факторов, определяющих его динамику, необходимо отметить:

- стимулирующее влияние на новое строительство роста загрузки мощностей отечественных производителей в условиях импортозамещения, вызванного зарубежными санкциями;
- усложнение новых проектов строительства и реконструкции промышленных предприятий в связи с сокращением ассортимента и доступности целого ряда позиций, наличием позиций, по которым нельзя сейчас найти замену, ухудшением условий сотрудничества с зарубежными компаниями как на этапе строительства, так и на этапе пусконаладочных работ;

- удорожание новых проектов строительства и реконструкции промышленных предприятий в связи с удорожанием импортируемого оборудования, ростом стоимости строительных материалов, усложнением логистики;

- трудности с привлечением финансирования в связи с удорожанием кредитов, усложнением условий их получения.

Нежилое строительство также характеризуется значительной региональной дифференциацией: на топ-10 регионов по общей площади введенных в последние годы зданий приходится половина от общероссийского ввода. При этом перечень регионов с наибольшим объемом вводов практически не изменяется и включает: г. Москву; г. Санкт-Петербург; Московскую, Ленинградскую, Тюменскую, Свердловскую, Ростовскую области; Краснодарский край; Республики Татарстан и Башкортостан. До 90 % строительной продукции отрасли производится в европейской части страны (до Урала включительно), при этом более половины — в Центральном федеральном округе.

Отдельно укажем на инфраструктурное строительство, являющееся важнейшим фактором экономического роста и обеспечения безопасности страны. Эмпирическое исследование Ашауэра [17] показало высокую зависимость влияния инфраструктурных расходов на экономический рост в США. Аналогичные исследования для российской экономики свидетельствуют о меньшем, но все же значимом влиянии, имеющем сложный, нелинейный характер [18]. Так, рассчитанные в работе [19] мультипликаторы расходов на дорожную инфраструктуру и транспорт оценены на уровне 0,26 для темпов роста ВВП. В труде [20] мультипликативный эффект сектора «Транспортировка и хранение» равен 1,32. В исследовании [21] показано влияние развития транспортной инфраструктуры на совокупную факторную производительность на микроуровне (предприятие, город).

Несмотря на сложную макроэкономическую обстановку, продолжается активное инфраструктурное строительство: в 2023 г. было построено 304 МВт мощностей электростанций, 3,7 тыс. км линий электропередач, 2,2 тыс. км автомобильных дорог с твердым покрытием. Нарастивался ввод объектов жилищно-коммунального хозяйства: канализации, газовых сетей, сетей теплоснабжения, объектов социально-культурного назначения.

Позитивная динамика строительства нашла отражение в загрузке производственных мощностей строительных организаций, достигших уровня 65,0–65,5 % в 2021–2023 гг. и снизившихся до 57–55 % в 2023–2024 гг. (рис. 2).

В качестве негативной тенденции следует отметить увеличение объема незавершенного строительства: достигнув в 2019 г. минимального значения 77,8 тыс. ед., число зданий и сооружений, находя-



**Рис. 2.** Средний уровень использования производственных мощностей строительных организаций в Российской Федерации, %

**Fig. 2.** Average level of utilization of production capacities of construction organizations in the Russian Federation, %

щихся в незавершенном строительстве, увеличивалось, составив в 2022 г. 88,0 тыс. ед., а в 2023 г. выросло до 97,6 тыс. ед.

Важнейшим фактором успешного функционирования строительного сектора является его ресурсное обеспечение. Основные фонды строительной отрасли составляют порядка 3,8 трлн руб., на них приходится около 1 % основного капитала страны. Анализ процессов обновления фондов строительного сектора свидетельствует, что он протекал активнее, чем по экономике в целом. Так, коэффициент обновления находился на уровне 8,3 %, что практически в 2 раза выше, чем в целом по экономике, где коэффициент обновления составил порядка 4,3 %. Наиболее интенсивно обновлялись в строительстве транспортные средства (коэффициент обновления 9,9 %), а также машины и оборудование (коэффициент обновления 8,3 %). В целом по экономике соответствующие показатели составляли 9,1 и 6,3 %. Интенсивность выбытия основных фондов в строительстве была ниже, среднее значение коэффициента выбытия составляло 0,8 % в целом по основным фондам, 1,3 и 0,7 % соответственно по машинам и оборудованию и транспортным средствам.

Среди позитивных тенденций отметим снижение удельного веса строительных машин с истекшим сроком службы, наблюдаемое практически по всем основным видам машин: экскаваторам, бульдозерам, башенным кранам и кранам на гусеничном ходу, грейдерам и прочим.

В то же время, несмотря на достаточно активный процесс обновления основного капитала, его функционирование характеризуется рядом негативных тенденций. В частности, достаточно длительное время в строительстве на фоне роста фондовооруженности наблюдается тенденция снижения фондоотдачи: в среднем на 6,2 % в год начиная с 2013 г. За пятилетие 2017–2021 гг. фондоотда-

ча сократилась на 31,1 % (снижение по экономике в целом за этот период составило 10,5 %).

Степень износа основных фондов в строительстве находится на уровне 48–52 %. Если в период 2015–2018 гг. уровень износа основных фондов в строительстве примерно соответствовал уровню износа основных фондов, характерных для экономики в целом, то с 2019 г. в строительстве наметилась тенденция увеличения степени износа основных фондов при снижении этого показателя по экономике в целом. В 2021 г. степень износа основных фондов в строительстве, составлявшая 50,5 %, на 10 п.п. превышала аналогичный показатель по экономике в целом. Следует учитывать, что приведенные данные характеризуют так называемый «бухгалтерский» износ, который может не соответствовать их физическому состоянию. В то же время высокие характеристики изношенности основных фондов, эксплуатация техники за пределами экономически оправданных сроков службы позволяют представить общую картину состояния строительного оборудования, уровень его физического и морального износа. Доля полностью изношенных машин и оборудования, используемых при проведении строительных работ, составляет 22–28 %, что несколько ниже, чем по экономике в целом (28–30 %).

Еще одним негативным моментом является значительная импортозависимость строительного сектора. От 30 до 70 % и более используемых в строительстве основных видов машин представлены зарубежными образцами. Наибольшая доля импортного оборудования по одноковшовым экскаваторам составила в 2023–2024 гг. порядка 80 %. Более половины используемых в строительстве бульдозеров, кранов на гусеничном ходу, башенных строительных кранов и других импортного производства. По основным строительным машинам на-

блюдалась тенденция увеличения удельного веса машин импортного производства.

В части обеспечения строительства трудовыми ресурсами отрасль сталкивается с дефицитом кадров как рабочих низкой квалификации, так и специалистов высокого уровня, что существенно осложняет выполнение намеченных государственных и частных проектов. Дефицит специалистов испытывают сегодня около 85 % строительных компаний<sup>10</sup>.

В числе причин кадрового дефицита, наряду с ростом объемов строительных работ, такие факторы, как отток трудовых мигрантов, призыв работников на военную службу, конкуренция со стороны других отраслей, предлагающих более высокий уровень оплаты труда.

В поисках путей оптимизации затрат компании отказываются от посреднических агентов в пользу «уберизации» при найме персонала, привлекают на стройку самозанятых, что дает возможность сократить фонд оплаты труда.

Нехватка кадров ведет к увеличению сроков строительства, снижению качества работ, удорожанию строительных объектов, в том числе за счет увеличения зарплат для удержания сотрудников и привлечения новых.

Важнейшее условие успешного развития строительного комплекса — обеспечение всех стадий строительного процесса необходимыми материалами. Объемы производства строительных материалов в России практически полностью покрывают платежеспособный рост строительного рынка и его требования по качеству. Объемы импортных поставок по основной продукции, за исключением отдельных видов отделочных материалов, элитной сантехники и т.п., незначительны. При этом по основным видам производимой строительной продукции сохраняются определенные резервы мощностей. Ниже всего загрузка в добывающих производствах — мощности по добыче гравия, песка, щебня, природного камня использовались на 40–60 %. При сохранении определенных производственных резервов по таким позициям, как фанера, портландцемент, блоки и прочие сборные строительные изделия, материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные и другие, где загрузка составляет 50–70 %, по ряду позиций резервы дозагрузки незначительны или практически отсутствуют — керамические плитки фасадные, керамические плитки для полов, плиты древесно-волоконные и древесно-стружечные (уровень загрузки мощностей 85 % и выше). Соответственно, стабильное обеспечение строительного комплекса материалами требует своевременного ввода новых мощностей.

На многих предприятиях по производству стройматериалов осуществлена модернизация про-

изводства (в разной степени), реализованы программы развития, освоены новые виды продукции, технологии выпуска стройматериалов, изделий и конструкций, которые прежде не выпускались на территории России. Промышленность строительных материалов обрела достаточную устойчивость и опыт в производстве широкого ряда продукции, не уступающей по качеству зарубежным аналогам, и ищет пути адаптации к новым условиям. В то же время сформированный значительный массив зарубежного оборудования, для стабильной работы которого на протяжении всего срока службы необходимы регулярное обслуживание, поставка комплектующих и запасных частей, в условиях международных санкций и снижения курса национальной валюты требует дополнительных усилий и затрат и ведет к росту стоимости строительных материалов.

Таким образом, несмотря на в целом позитивное динамичное развитие строительной отрасли и успешное выполнение намеченных в рамках документов стратегического планирования мероприятий (результатов) строительного типа и достижения запланированных показателей, сегодня существует группа как внутренних, так и внешних факторов, которые могут оказывать негативное влияние на реализацию стратегических целей развития страны.

Такие внутренние проблемы строительной отрасли, как дефицит кадров, увеличение износа основных фондов, значительная импортозависимость прежде всего в части строительных машин и оборудования, высокий уровень загрузки ряда мощностей, в частности, по производству стройматериалов могут тормозить ее развитие и оказывать негативное влияние на способность отрасли успешно реализовывать стоящие перед ней задачи.

Сфера строительства тесно связана с общеэкономической ситуацией в стране. Соответственно, реализация проектов по строительству жилья, созданию социальной, транспортной и коммунальной инфраструктуры в рамках государственных программ РФ, национальных (федеральных) проектов сопряжена с рядом ограничений, включая финансовые, экономические, регуляторные, демографические, бюджетные, рыночные, процентные, технологические [9–12]. Такие факторы, как снижение темпов экономического роста, снижение инвестиций, падение доходов граждан, уменьшение доходов предприятий, снижение рентабельности производственной деятельности, рост цен, изменение денежно-кредитных условий, могут оказывать влияние на уровень достижения показателей жилищной сферы [13–15], нежилого и инфраструктурного строительства. Указанные факторы и ограничения могут существенно повлиять на инвестиционную привлекательность и рентабельность строительных проектов, на их финансирование, снизить их эффективность. В этой связи важно выявлять факторы, по-

<sup>10</sup> В России около 85 % строительных компаний испытывают дефицит кадров // Интерфакс. URL: <https://www.interfax.ru/business/999344>



тенциально способные воздействовать на динамику строительства, анализировать имеющие место или формирующиеся тенденции, которые могут привести к негативным последствиям реализации мероприятий государственных проектов и программ.

Среди негативных факторов и ограничений, тормозящих темпы развития строительной отрасли, с учетом сложившейся макроэкономической обстановки и конъюнктуры рынка, следует особо выделить:

- снижение спроса: на рынке жилой недвижимости экономическая нестабильность и инфляционные процессы приводят к сокращению реальных доходов населения, что снижает его платежеспособность и, соответственно, спрос на жилье [22]; общеэкономическая нестабильность, замедление экономического роста, снижение инвестиционной активности влияют в сторону снижения на промышленное и инфраструктурное строительство;
- увеличение стоимости заемных ресурсов: удорожание заемных средств для строительных компаний (в рамках банковского проектного финансирования) ведет к сокращению вновь начинаемых проектов и увеличению сроков строительства реализуемых проектов; увеличение процентных ставок по ипотечным займам для населения делает приобретение жилья менее доступным для широкого круга потенциальных покупателей, что оказывает негативное давление на рынок недвижимости [23–27];
- рост задолженности участников рынка ведет к дестабилизации строительной индустрии и, как следствие, к возможному падению занятости в этом важном сегменте экономики;
- рост цен: инфляционные процессы на рынке строительных материалов приводят к удорожанию строительной продукции, снижают спрос, уменьшают прибыльность производителей; перегрев рынка недвижимости может привести к его переоценке и последующему снижению спроса, что негативно скажется на объемах строительства и реализации

жилья; сложности в связи с ростом себестоимости строительства испытывают подрядные организации, реализующие инфраструктурные проекты;

- усложнение новых проектов строительства и реконструкции промышленных предприятий в связи с сокращением ассортимента и доступности ряда позиций, наличием позиций, по которым сложно найти замену, ухудшением условий сотрудничества с зарубежными компаниями как на этапе строительства, так и на этапе пусконаладочных работ;
  - значительная доля вторичного жилья: высокий уровень предложения на рынке вторичного жилья ограничивает возможности для роста цен на новое жилье, что снижает рентабельность застройщиков и замедляет развитие строительной отрасли; нелегальный рынок арендного жилья, не учитываемый официальной статистикой, также оказывает влияние на рынок недвижимости, снижая спрос на покупку жилья и увеличивая риски для инвесторов [28–30];
  - перенос застройщиками сроков сдачи объектов в эксплуатацию на полгода и более в связи с наблюдающимся снижением спроса особенно в сфере жилищного строительства (запуск новых проектов сократился в текущем году на 23 % относительно предыдущего года).
- В настоящее время отсутствует унифицированная классификация факторов и ограничений, которые могут оказывать негативное влияние на реализацию государственных программ и проектов как в целом, так и в части строительной деятельности. В табл. 6 представлены наиболее значимые, по мнению авторов, внешние для строительной сферы ограничения и их влияние на реализацию национальных целей на примере цели «Комфортная и безопасная среда для жизни».
- Представленная в табл. 6 структура ограничений не является исчерпывающей. Изменение внешних обстоятельств может привести как к возникно-

Табл. 6. Влияние внешних рисков на отдельные параметры Единого плана, характеризующие развитие инвестиционно-строительной сферы

Table 6. The impact of external risks on individual parameters of the Unified Plan characterizing the development of the investment and construction sector

Наименование факторов и ограничений Name of factors and constraints	Показатели национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни», на достижение которых могут повлиять ограничения Indicators of the national goal “Comfortable and safe living environment”, the achievement of which may be affected by constraints
Нестабильность национальной валюты Instability of the national currency	Повышение доступности жилья на первичном рынке Increasing the availability of housing in the primary market
Жесткие денежно-кредитные условия Tight monetary conditions	Обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м <sup>2</sup> на человека к 2030 г. и не менее 38 м <sup>2</sup> к 2036 г. Повышение доступности жилья на первичном рынке.



Продолжение табл. 6 / Continuation of the Table 6

Наименование факторов и ограничений Name of factors and constraints	Показатели национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни», на достижение которых могут повлиять ограничения Indicators of the national goal “Comfortable and safe living environment”, the achievement of which may be affected by constraints
	Строительство и реконструкция (модернизация) не менее чем 2 тыс. объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки к 2030 г. Providing citizens with housing with a total area of at least 33 square metres per person by 2030 and at least 38 square metres by 2036. Increasing the availability of housing on the primary market. Construction and reconstruction (modernization) of at least 2 thousand drinking water supply and water treatment facilities by 2030
Высокий уровень инфляции High inflation	Повышение доступности жилья на первичном рынке High inflation Increasing housing affordability in the primary market
Замедление/падение темпов экономического роста Slowdown/fall in economic growth	Обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м <sup>2</sup> на человека к 2030 г. и не менее 38 м <sup>2</sup> к 2036 г. Обновление к 2030 г. жилищного фонда не менее чем на 20 % по сравнению с показателем 2019 г. Устойчивое сокращение непригодного для проживания жилищного фонда. Повышение доступности жилья на первичном рынке. Благоустройство не менее чем 30 тыс. общественных территорий и реализация в малых городах и исторических поселениях не менее чем 1600 проектов победителей Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды к 2030 г. Реализация программы модернизации коммунальной инфраструктуры и улучшение качества предоставляемых коммунальных услуг для 20 млн чел. к 2030 г. Строительство и реконструкция (модернизация) не менее чем 2 тыс. объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки к 2030 г. Providing citizens with housing with a total area of at least 33 square metres per person by 2030 and at least 38 square metres by 2036. Renewal of the housing stock by at least 20 percent by 2030 compared to the 2019 figure. Sustainable reduction of uninhabitable housing stock. Increasing the affordability of housing on the primary market. Improvement of at least 30 thousand public areas and implementation of at least 1,600 projects of the winners of the All-Russian competition of the best projects for creating a comfortable urban environment in small towns and historical settlements by 2030. Implementation of the programme for modernization of public infrastructure and improvement of the quality of public services provided for 20 million people by 2030. Construction and reconstruction (modernization) of at least 2 thousand drinking water supply and water treatment facilities by 2030
Ухудшение финансовой стабильности организаций Deterioration of financial stability of organizations	Обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м <sup>2</sup> на человека к 2030 г. и не менее 38 м <sup>2</sup> к 2036 г. Устойчивое сокращение непригодного для проживания жилищного фонда. Повышение доступности жилья на первичном рынке. Благоустройство не менее чем 30 тыс. общественных территорий и реализация в малых городах и исторических поселениях не менее чем 1600 проектов победителей Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды к 2030 г. Реализация программы модернизации коммунальной инфраструктуры и улучшение качества предоставляемых коммунальных услуг для 20 млн чел. к 2030 г. Строительство и реконструкция (модернизация) не менее чем 2 тыс. объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки к 2030 г. Providing citizens with housing with a total area of at least 33 square metres per person by 2030 and at least 38 square metres by 2036. Sustainable reduction of uninhabitable housing stock. Increasing the availability of housing on the primary market. Improvement of at least 30 thousand public areas and implementation in small towns and historical settlements of at least 1,600 projects of the winners of the All-Russian competition of the best projects for creating a comfortable urban environment by 2030. Implementation of the programme for modernization of public infrastructure and improvement of the quality of public services provided for 20 million people by 2030. Construction and reconstruction (modernization) of at least 2 thousand drinking water supply and water treatment facilities by 2030

Наименование факторов и ограничений Name of factors and constraints	Показатели национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни», на достижение которых могут повлиять ограничения Indicators of the national goal “Comfortable and safe living environment”, the achievement of which may be affected by constraints
Сокращение доходов федерального бюджета Reduction of federal budget revenues	Обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м² на человека к 2030 г. и не менее 38 м² к 2036 г. Обновление к 2030 г. жилищного фонда не менее чем на 20 % по сравнению с показателем 2019 г. Устойчивое сокращение непригодного для проживания жилищного фонда. Повышение доступности жилья на первичном рынке. Благоустройство не менее чем 30 тыс. общественных территорий и реализация в малых городах и исторических поселениях не менее чем 1600 проектов победителей Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды к 2030 г. Реализация программы модернизации коммунальной инфраструктуры и улучшение качества предоставляемых коммунальных услуг для 20 млн чел. к 2030 г. Строительство и реконструкция (модернизация) не менее чем 2 тыс. объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки к 2030 г. Providing citizens with housing with a total area of at least 33 square metres per person by 2030 and at least 38 square metres by 2036. Renewal of the housing stock by at least 20 percent by 2030 compared to the 2019 figure. Sustainable reduction of uninhabitable housing stock. Increasing the affordability of housing on the primary market. Improvement of at least 30 thousand public areas and implementation of at least 1,600 projects of the winners of the All-Russian competition of the best projects for creating a comfortable urban environment in small towns and historical settlements by 2030. Implementation of the programme for modernization of public infrastructure and improvement of the quality of public services provided for 20 million people by 2030. Construction and reconstruction (modernization) of at least 2 thousand drinking water supply and water treatment facilities by 2030
Уровень доходов населения Income level of the population	Обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м² на человека к 2030 г. и не менее 38 м² к 2036 г. Обновление к 2030 г. жилищного фонда не менее чем на 20 % по сравнению с показателем 2019 г. Повышение доступности жилья на первичном рынке Providing citizens with housing with a total area of at least 33 square metres per person by 2030 and at least 38 square metres by 2036. Renewal of the housing stock by 2030 by at least 20 percent compared to the 2019 figure. Increasing the availability of housing on the primary market

вению новых ограничений, так и к ослаблению или исчезновению существующих. Для превращения перечня ограничений в действенный инструмент управления реализацией государственных программ и проектов целесообразна разработка пороговых значений индикаторов таких ограничений, по изменению которых можно превентивно судить о повышении вероятности их наступления.

Выявление основных ограничений, определяющих развитие строительства, разработка своевременных и адекватных мер по их нейтрализации будут способствовать позитивному развитию данной сферы. В задаче управления реализацией государственных программ и проектов необходимо разрабатывать и внедрять комплексные меры, направленные на улучшение инвестиционного климата, оптимизацию регуляторной среды, развитие внутреннего рынка и повышение эффективности использования ресурсов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Согласно документам стратегического планирования, к 2030 г. в РФ намечается существенное повышение качества жизни населения за счет развития сферы жилищного строительства; механизмов, направленных на обеспечение граждан жильем; создания объектов социальной, транспортной и иной инфраструктуры.

Строительная сфера России демонстрирует устойчивый рост: объем строительных работ за последние пять лет вырос на 31 %, успешно реализуются национальные проекты «Жилье и городская среда», «Безопасные качественные дороги», сформированы заделы для перспективного поступательного развития.

Несмотря на в целом позитивное развитие строительной отрасли и успешное выполнение намеченных в рамках документов стратегического планирования мероприятий (результатов) строи-

тельного типа и достижения запланированных показателей, ряд тенденций в строительной сфере не соответствует стратегическим задачам по повышению уровня жизни населения, формированию комфортной и безопасной среды для жизни, устойчивому и динамичному экономическому развитию, обеспечению технологического лидерства. В частности, рекордные уровни вводов, достигнутые в жилищном строительстве, сопровождаются трендом на уменьшение средней площади и комнатности квартир; сохраняется значительная дифференциация ввода как жилых, так и нежилых зданий в региональном разрезе; увеличивается объем незавершенного строительства; наблюдается тенденция снижения фондоотдачи. В строительных организациях сохраняются высокий уровень износа основных фондов, значительная доля импортного оборудования, дефицит кадров как рабочих низкой квалификации, так и специалистов высокого уровня, трудности с привлечением финансирования в связи с удорожанием кредитов, усложнением условий их получения.

Выявление и комплексный анализ как внешних, так и внутренних факторов, определяющих динамику строительства и формирующих тенденции в этой сфере, позволят повысить качество стратегического планирования и выработки адекватных мер реагирования на возникающие проблемы.

В числе наиболее значимых внешних факторов, способных оказывать негативное влияние на развитие строительной отрасли и реализацию стратегических целей развития страны в сфере строительства, следует отметить замедление макроэкономической динамики, внешнеэкономические ограничения, снижение спроса как на жилую, так и на нежилую недвижимость, рост стоимости заемных средств, рост уровня закредитованности и ухудшение финансовой стабильности, высокий уровень инфляции и сокращение доходов федерального бюджета.

Для обеспечения устойчивого развития строительной отрасли, повышения инвестиционной привлекательности проектов необходимо выявлять и анализировать факторы и ограничения, разрабатывать меры по их нейтрализации. В этой связи требуется в ближайшей перспективе целенаправленно разработать и осуществить комплекс мер по недопущению негативных сценариев развития строитель-

ной отрасли. В их числе могут быть мероприятия, направленные на:

- повышение доступности жилья для населения путем продления льготной программы ипотечного кредитования до 2030 г., повышения предельного размера семейной ипотеки с учетом количества детей и региональных различий в средней стоимости квадратного метра, использования механизма жилищно-накопительных сбережений, предоставления рассрочки при покупке готового жилья у застройщика после ввода объекта в эксплуатацию;
- создание благоприятных условий для развития востребованного населением индивидуального жилищного строительства, в частности, путем выделения обеспеченных необходимой инфраструктурой земельных участков, расширения границ населенных пунктов за счет неиспользуемых и малоценных земель сельскохозяйственного назначения;
- наращивание темпов строительства объектов в опорных населенных пунктах, в том числе в малых городах, путем внедрения новых и доказавших свою востребованность финансовых инструментов, разграничения сфер применения таких градостроительных документов, как генеральные планы и мастер-планы, и правовом закреплении последних;
- расширение сферы действия механизма соглашения по защите и поощрению капиталовложений путем применения его для жилищного строительства и создания объектов инфраструктуры;
- активное распространение опыта строительства арендного жилья и использование его для более широкой категории населения;
- стимулирование строительства в промышленности посредством субсидирования ключевой ставки, установления повышенного и возобновляемого регионального лимита для новых проектов;
- системное внедрение и масштабирование инноваций и энергосберегающих технологий в строительстве, поддержку инициатив разработчиков на всех уровнях государственной и муниципальной власти, широкое и открытое освещение лучших разработок и результатов по их практическому внедрению у пользователей;
- повышение производительности труда и эффективности всех звеньев строительного комплекса.

Интеграция таких мер в государственные проекты и программы в сфере строительства позволит минимизировать негативное влияние факторов и будет способствовать достижению национальных целей развития страны.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смыслова О.Ю., Трутенько Е.В. Инфраструктурные проекты в России: сущность, классификация и факторы выбора локации для реализации крупных инициатив // Экономика, предприниматель-

ство и право. 2025. Т. 15. № 4. С. 2737–2754. DOI: 10.18334/erp.15.4.123143

2. Беляков И.В. О количественной оценке рисков инфраструктурных проектов с государ-

ственным участием // Вопросы государственного и муниципального управления. 2022. № 4. С. 30–60. DOI: 10.17323/1999-5431-2022-0-4-30-60. EDN BPBPZNT.

3. Дрожжевская А.А. Особенности реализации инфраструктурных проектов в современных условиях // Инновации и инвестиции. 2024. № 1. С. 428–430. EDN QEFOCY.

4. Леонов И.А. Оценка эффективности инфраструктурных проектов // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. Т. 21. № 2. С. 62–77. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-2-62-77. EDN BVKSTK.

5. Кожевников С.А., Патракова С.С. Эффективность программно-целевого и проектного подходов в решении жилищной проблемы в России // ЭКО. 2023. № 7 (589). С. 71–94. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-7-71-94. EDN IGCVMI.

6. Никитина Н.С. Анализ факторов, влияющих на динамику цен на жилую недвижимость в России // Финансы: теория и практика. 2023. Т. 27. № 1. С. 208–220. DOI: 10.26794/2587-5671-2023-27-1-208-220. EDN RBWHNI.

7. Звездина Н.В., Сараев А.В. Анализ и моделирование влияния макроэкономических факторов на ввод в эксплуатацию жилой недвижимости в России // Вопросы статистики. 2023. Т. 30. № 1. С. 27–41. DOI: 10.34023/2313-6383-2023-30-1-27-41. EDN QUZTEA.

8. Лимарь И.А. Основные направления развития строительной отрасли в России на современном этапе // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 8–1. С. 138–145. DOI: 10.34670/AR.2023.52.63.014. EDN QHMHJI.

9. Курманова Л.Р., Садыкова А.И., Хабибуллин Р.Г. Тенденции развития сферы жилищного строительства в современных условиях // Инновационное развитие экономики. 2021. № 5 (65). С. 105–113. DOI: 10.51832/2223-798420215105. EDN ZSEEDN.

10. Сулимова Е.А., Новицкая Д.А. Развитие цифровой экономики в сфере строительства // Экономика строительства. 2022. № 10. С. 89–95. EDN JIFDVM.

11. Берлизев Р.Н., Борисова К.С. Проблемы и перспективы развития строительной отрасли в России // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 9–1 (79). С. 28–32. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-9-1-28-32. EDN XABEJJ.

12. Калмуратов Б.С., Бектурдиев М.Б. Формирование инновационной стратегии развития в конкурентной среде строительной индустрии // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. № 6. С. 336–344. DOI: 10.33619/2414-2948/67/37. EDN YPWMKC.

13. Медяник Ю.В., Шагиахметова Э.И. Инвестиционная привлекательность строительства объектов социальной инфраструктуры в регионах // Ре-

гиональные проблемы преобразования экономики. 2022. № 8 (142). С. 32–40. DOI: 10.26726/1812-7096-2022-8-32-40. EDN ZHZPDW.

14. Солдатова Л.А., Чигрова Н.В. Финансовое регулирование развития жилищного строительства // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 1 (176). С. 101–106. EDN TWQYBH.

15. Глаголев Е.С., Сулейманова Л.А., Марушко М.В. Развитие жилищного строительства в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 17–22. DOI: 10.12737/23587. EDN XHLEEZ.

16. Рыкова И.Н., Рыков Г.К. Обзор бюджетных расходов как инструмент повышения эффективности // Креативная экономика. 2021. Т. 15. № 4. С. 1275–1294. DOI: 10.18334/ce.15.4.111971. EDN VTBOXJ.

17. Aschauer D.A. Is public expenditure productive? // Journal of Monetary Economics. 1989. Vol. 23. Issue 2. Pp. 177–200. DOI: 10.1016/0304-3932(89)90047-0

18. Скрыпник Д.В. Инфраструктура и экономический рост в контексте эволюционной теории экономической политики // Журнал Новой экономической ассоциации. 2024. № 1 (62). С. 117–142. DOI: 10.31737/22212264\_2024\_1\_117-142. EDN IPPSWT.

19. Кудрин А.Л., Кнобель А.Ю. Бюджетная политика как источник экономического роста // Вопросы экономики. 2017. № 10. С. 5–26. DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-5-26. EDN ZIDOAT.

20. Ксенофонов М.Ю., Широков А.А., Ползиков Д.А., Янговский А.А. Оценка мультипликативных эффектов в российской экономике на основе таблиц «затраты – выпуск» // Проблемы прогнозирования. 2018. № 2 (167). С. 3–13. EDN YLXLFR.

21. Пономарев Ю. Влияние транспортной инфраструктуры на совокупную факторную производительность фирм: оценка для городов России // Экономическая политика. 2022. Т. 17. № 1. С. 102–125. DOI: 10.18288/1994-5124-2022-1-102-125. EDN ANGAHA.

22. Мигунов И.Н. Оценка реализуемости национального проекта для улучшения жилищных условий населения // Жилищное строительство. 2020. № 8. С. 40–47. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-8-40-47. EDN LYTCCQ.

23. Мишура А.В. Ипотечное кредитование и цены на жилье: необоснованные обвинения? // Вопросы экономики. 2023. № 3. С. 63–82. DOI: 10.32609/0042-8736-2023-3-63-82. EDN NEHSA.

24. Liu Lu. Mortgage loan and housing market // International Review of Economics & Finance. 2023. Vol. 83. Pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.iref.2022.10.012. EDN IHCKGI.

25. Horvath Ja., Rothman Ph. Mortgage spreads, asset prices, and business cycles in emerging countries // Journal of International Money and Finance.



2021. Vol. 115. P. 102370. DOI: 10.1016/j.jimonfin.2021.102370. EDN IDPECN.

26. Michelsen C. Rising Interest Rates Pull the Plug on the Construction Industry // *Wirtschaftsdienst*. 2023. Vol. 103. Issue 1. Pp. 16–19. DOI: 10.2478/wd-2023-0009. EDN QIVVJW.

27. Akgündüz Yu.E., Dursun-de Neef H.Ö., Hacıhasanoğlu Ya.S., Yılmaz F. Cost of credit, mortgage demand and house prices // *Journal of Banking & Finance*. 2023. Vol. 154. P. 106953. DOI: 10.1016/j.jbankfin.2023.106953. EDN YQDTCY.

28. Кашина Е.В., Глоба С.Б., Бырдин Д.А. Рынок арендного жилья: динамика и перспективы развития // *Известия высших учебных заведе-*

ний. Строительство. 2022. № 10 (766). С. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-82-93. EDN OQKVCE.

29. Balode S., Kamols U. Rental housing market in Riga: Price determinants and lesson keys of Helsinki // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. 2019. Vol. 7. Issue 1. Pp. 6–17. DOI: 10.2478/bjreecm-2019-0001

30. Rubaszek M., Rubio M. Does the rental housing market stabilize the economy? A micro and macro perspective // *Empirical Economics*. 2020. Vol. 59. Issue 1. Pp. 233–257. DOI: 10.1007/s00181-019-01638-z

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Алексеевна Кириченко** — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, руководитель центра; **Всероссийская академия внешней торговли Министерства экономического развития Российской Федерации (ВАВТ Минэкономразвития Россия)**; 119285, г. Москва, Воробьевское шоссе, д. 6А; доцент кафедры менеджмента и инноваций, Институт промышленного и гражданского строительства (ИПГС); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9294-8655, ORCID: 0000-0002-1657-5648; 94522@bk.ru;

**Татьяна Николаевна Маршова** — кандидат экономических наук, доцент, заведующий лабораторией; **Всероссийская академия внешней торговли Министерства экономического развития Российской Федерации (ВАВТ Минэкономразвития Россия)**; 119285, г. Москва, Воробьевское шоссе, д. 6А; SPIN-код: 9835-8000, ORCID: 0000-0001-6459-7342; Marshovat@yandex.ru;

**Иван Николаевич Мигунов** — кандидат экономических наук, заведующий лабораторией; **Всероссийская академия внешней торговли Министерства экономического развития Российской Федерации (ВАВТ Минэкономразвития Россия)**; 119285, г. Москва, Воробьевское шоссе, д. 6А; SPIN-код: 8382-3148, ORCID: 0000-0001-6459-7342; inmig@mail.ru;

**Ирина Борисовна Петросян** — кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономической теории и проблем экономики переходного периода; **Российско-Армянский (Славянский) университет (РАУ)**; ул. Овсепя Эмина, д. 123, г. Ереван, 0051, Республика Армения; irina.petrosyan@rau.am.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Smyslova O.Y., Trutenko E.V. Infrastructure projects in Russia: nature, classification and site selection factors for major initiatives. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2025; 15(4):2737-2754. DOI: 10.18334/epp.15.4.123143 (rus.).

2. Belyakov I.V. On quantitative risk assessment of infrastructural projects with state participation. *Public Administration Issues*. 2022; 4:30-60. DOI: 10.17323/1999-5431-2022-0-4-30-60. EDN PBPZNT. (rus.).

3. Drozhzhvinkina A.A. Features of the implementation of infrastructure projects in modern conditions.

*Innovations & Investments*. 2024; 1:428-430. EDN QEFOCY. (rus.).

4. Leonov I.A. Assessing the efficiency of infrastructure projects. *Scientific Proceedings: Institute of Economic Forecasting Ras*. 2023; 21(2):62-77. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-2-62-77. EDN BVKSTK. (rus.).

5. Kozhevnikov S.A., Patrakova S.S. The effectiveness of program-targeted and project-based approaches to solving the housing problem in Russia. *ECO*. 2023; 7(589):71-94. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-7-71-94. EDN IGCVM. (rus.).

6. Nikitina N.S. Analysis of factors affecting the dynamics of residential real estate prices in Russia. *Finance: Theory and Practice*. 2023; 27(1):208-220. DOI: 10.26794/2587-5671-2023-27-1-208-220. EDN RBWHHI. (rus.).
7. Zvezdina N.V., Saraev A.V. Analysis and modeling of the impact of macroeconomic factors on the commissioning of residential real estate in Russia. *Voprosy Statistiki*. 2023; 30(1):27-41. DOI: 10.34023/2313-6383-2023-30-1-27-41. EDN QUZTEA. (rus.).
8. Limar' I.A. The main directions of development of the construction industry in Russia at the present stage. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2023; 13(8-1):138-145. DOI: 10.34670/AR.2023.52.63.014. EDN QHMHJI. (rus.).
9. Kurmanova L.R., Sadykova A.I., Khabibullin R.G. Trends in the development of the housing construction sector in modern conditions. *Innovative Development of Economy*. 2021; 5(65):105-113. DOI: 10.51832/2223-798420215105. EDN ZSEEDN. (rus.).
10. Sulimova E.A., Novickaya D.A. Development of the digital economy in the construction industry. *Construction Economy*. 2022; 10:89-95. EDN JIFDVM. (rus.).
11. Berlizev R.N., Borisova K.S. Problems and prospects of development of the construction industry in Russia. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2021; 9-1(79):28-32. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-9-1-28-32. EDN XABEJJ. (rus.).
12. Kalmuratov B., Bekturdiyev M. The formation of innovative development strategy in competitive environment of the construction industries. *Bulletin of Science and Practice*. 2021; 7(6):336-344. DOI: 10.33619/2414-2948/67/37. EDN YPWMKC. (rus.).
13. Medyanik Yu.V., Shagiakhmetova E.I. Investment attractiveness of the construction of social infrastructure facilities in the regions. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2022; 8(142):32-40. DOI: 10.26726/1812-7096-2022-8-32-40. EDN ZHZPDW. (rus.).
14. Soldatov L.A., Chigrova N.V. Financial regulation of development housing. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2015; 1(176):101-106. EDN TWQYBH. (rus.).
15. Glagolev E.S., Suleymanova L.A., Marushko M.V. Development of housing construction in Russia. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017; 1:17-22. DOI: 10.12737/23587. EDN XHLEEZ. (rus.).
16. Rykova I.N., Rykov G.K. Overview of budgetary expenditure as a tool to increase the effectiveness. *Creative Economy*. 2021; 15(4):1275-1294. DOI: 10.18334/ce.15.4.111971. EDN VTBOXJ. (rus.).
17. Aschauer D.A. Is public expenditure productive? *Journal of Monetary Economics*. 1989; 23(2):177-200. DOI: 10.1016/0304-3932(89)90047-0
18. Skrypnik D.V. Infrastructure and economic growth in the context of the evolutionary theory of economic policy. *Journal of the New Economic Association*. 2024; 1(62):117-142. DOI: 10.31737/22212264\_2024\_1\_117-142. EDN IPPSWT. (rus.).
19. Kudrin A., Knobel A. Fiscal policy as a source of economic growth. *Voprosy Ekonomiki*. 2017; 10:5-26. DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-5-26. EDN ZIDOAT. (rus.).
20. Ksenofontov M.Y., Shirov A.A., Polzikov D.A., Yantovskii A.A. Assessing multiplier effects in the Russian economy: input-output approach. *Problems of Forecasting*. 2018; 2(167):3-13. EDN YLXLFR. (rus.).
21. Ponomarev Yu. Transport infrastructure development and total factor productivity at firm level: assessment for Russian cities. *Economic Policy*. 2022; 17(1):102-125. DOI: 10.18288/1994-5124-2022-1-102-125. EDN ANGAHA. (rus.).
22. Migunov I.N. Assessment of the realization of a national project for improving housing conditions of the population. *Housing Construction*. 2020; 8:40-47. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-8-40-47. EDN LYTCCQ. (rus.).
23. Mishura A.V. Mortgage lending and housing prices in Russia: unfounded accusations? *Voprosy Ekonomiki*. 2023; 3:63-82. DOI: 10.32609/0042-8736-2023-3-63-82. EDN NEHSOA. (rus.).
24. Liu Lu. Mortgage loan and housing market. *International Review of Economics & Finance*. 2023; 83:736-749. DOI: 10.1016/j.iref.2022.10.012. EDN IHCKGI.
25. Horvath Ja., Rothman Ph. Mortgage spreads, asset prices, and business cycles in emerging countries. *Journal of International Money and Finance*. 2021; 115:102370. DOI: 10.1016/j.jimonfin.2021.102370. EDN IDPECN.
26. Michelsen C. Rising Interest Rates Pull the Plug on the Construction Industry. *Wirtschaftsdienst*. 2023; 103(1):16-19. DOI: 10.2478/wd-2023-0009. EDN QIVVJW.
27. Akgündüz Yu.E., Dursun-de Neef H.Ö., Hacıhasanoğlu Ya.S., Yılmaz F. Cost of credit, mortgage demand and house prices. *Journal of Banking & Finance*. 2023; 154:106953. DOI: 10.1016/j.jbankfin.2023.106953. EDN YQDTCY.
28. Kashina E.V., Globa S.B., Byrdin D.A. Rental housing market: dynamics and prospects of development. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; 10(766):82-93. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-82-93. EDN OQKVCE. (rus.).
29. Balode S., Kamols U. Rental housing market in Riga: Price determinants and lesson keys of Helsinki. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. 2019; 7(1):6-17. DOI: 10.2478/bjreecm-2019-0001
30. Rubaszek M., Rubio M. Does the rental housing market stabilize the economy? A micro and macro perspective. *Empirical Economics*. 2020; 59(1):233-257. DOI: 10.1007/s00181-019-01638-z

*Received May 16, 2025.*

*Adopted in revised form on May 19, 2025.*

*Approved for publication on June 6, 2025.*

**B I O N O T E S:** **Irina A. Kirichenko** — Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher, Head of the Center; **All-Russian Academy of Foreign Trade of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation**; 6A Vorobyovskoe shosse, Moscow, 119285, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Management and Innovation, Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9294-8655, ORCID: 0000-0002-1657-5648; 94522@bk.ru;

**Tatyana N. Marshova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory; **All-Russian Academy of Foreign Trade of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation**; 6A Vorobyovskoe shosse, Moscow, 119285, Russian Federation; SPIN-code: 9835-8000, ORCID: 000-0002-5424-5041; Marshovat@yandex.ru;

**Ivan N. Migunov** — Candidate of Economic Sciences, Head of the Laboratory; **All-Russian Academy of Foreign Trade of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation**; 6A Vorobyovskoe shosse, Moscow, 119285, Russian Federation; SPIN-code: 8382-3148, ORCID: 0000-0001-6459-7342; inmig@mail.ru;

**Irina B. Petrosyan** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Economic Theory and Problems of the Transition Economy; **Russian-Armenian (Slavic) University (RAU)**; 123 Hovsep Emin st., Yerevan, 0051, Republic of Armenia; irina.petrosyan@rau.am.

*Authors' contribution: all authors have made equivalent contributions to the publication.*

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

Система наставничества в строительных организациях  
на этапе перехода к нормативно-правовому регулированию

Елена Валерьевна Романова<sup>1</sup>, Динара Римовна Хаирова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Филиал Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте (Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте)); г. Ташкент, Республика Узбекистан*

АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается роль системы наставничества в строительных организациях России, что становится особенно актуальным на фоне современных тенденций на рынке труда, где наблюдается кадровый дефицит в этой сфере. Цель исследования заключается в анализе существующих практик наставничества, выявлении факторов, влияющих на формирование и реализацию системы наставничества в строительных компаниях различного размера и специфики деятельности, на этапе перехода к нормативно-правовому регулированию деятельности наставников.

**Материалы и методы.** Исследование основывается на анализе материалов научных изданий и периодической печати; нормативно-правовых актах, относящихся к вопросам становления и функционирования системы наставничества; данных о рынке труда; результатах анкетирования, проведенного среди магистров, работающих в строительной отрасли; ресурсах сети интернет.

**Результаты.** Определены ключевые факторы, способствующие успешному введению наставничества, включая законодательные изменения и специфику организационной структуры компаний. Основные результаты показывают, что наставничество активно используется во многих строительных организациях, однако его формы и содержание варьируются в зависимости от размера компании. В малых организациях преобладают менее формализованные подходы, в то время как в крупных компаниях существует разнообразие методов и более четкое правовое регулирование.

**Выводы.** Подчеркивается необходимость создания системного подхода к наставничеству как способу повышения адаптации новых специалистов и снижения текучести кадров, а также рекомендаций по организационным и образовательным инициативам для улучшения качества наставничества в строительной сфере.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** наставничество, наставник, строительные организации, адаптация, молодые специалисты, строительная отрасль, система наставничества, кадровый дефицит

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность научным консультантам, анонимным рецензентам за полезные замечания, обучающимся магистратуры НИУ МГСУ за участие в опросе.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Романова Е.В., Хаирова Д.Р. Система наставничества в строительных организациях на этапе перехода к нормативно-правовому регулированию // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1264–1277. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1264-1277

**Автор, ответственный за переписку:** Елена Валерьевна Романова, RomanovaEV@mgsu.ru.

The mentoring system in construction organizations at the stage  
of transition to regulatory framework

Elena V. Romanova<sup>1</sup>, Dinara R. Khairova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Branch of Russian State University of Oil and Gaz (National Research University) named after I.M. Gubkin in Tashkent; Tashkent, Republic of Uzbekistan*

ABSTRACT

**Introduction.** This study examines the role of the mentoring system in Russian construction organizations, which is becoming especially relevant against the background of current trends in the labour market, where there is a shortage of personnel in this area. The purpose of the work is to analyze existing mentoring practices, identify factors influencing the formation and implementation of a mentoring system in construction companies of various sizes and specific activities, at the stage of transition to regulatory framework of mentors.

**Materials and methods.** The research is based on the analysis of materials from scientific publications and periodicals, regulatory legal acts related to the formation and functioning of the mentoring system, data on the labour market, the results of a survey conducted among masters working in the construction industry, and Internet resources.



**Results.** In the course of the work, key factors contributing to the successful introduction of mentoring were identified, including legislative changes and the specifics of the organizational structure of companies. The main results show that mentoring is actively used in many construction organizations, but its forms and content vary depending on the size of the company. In small organizations, less formalized approaches prevail, while in large companies there is a variety of methods and clearer legal framework.

**Conclusions.** The paper highlights the need to create a systematic approach to mentoring as a way to increase the adaptation of new specialists and reduce staff turnover, as well as recommendations on organizational and educational initiatives to improve the quality of mentoring in the construction sector.

**KEYWORDS:** mentoring, mentor, construction organizations, adaptation, young professionals

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the scientific consultants, anonymous reviewers for their useful comments, and students of the MGSU master's degree programme for participating in the survey.

**FOR CITATION:** Romanova E.V., Khairova D.R. The mentoring system in construction organizations at the stage of transition to regulatory framework. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1264-1277. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1264-1277 (rus.).

*Corresponding author:* Elena V. Romanova, RomanovaEV@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Наставничество в строительных организациях становится все более актуальной темой в свете текущих тенденций на рынке труда. На начало 2024 г. по данным Росстата на рынке труда отмечался рекордно низкий уровень безработицы — 2,9 %. Несмотря на это строительная отрасль в 2025 г. сохраняет за собой место в числе топ-5 отраслей с самым высоким кадровым дефицитом. По сведениям HeadHunter число вакансий, связанных со строительством, в 2023 г. по сравнению с 2022 г. увеличилось на 44 %, в 2024 г. — еще на 2 %. В 2025 г. оно снизилось на 15 % по сравнению с 2024 г., но не закрыло разрыва, образовавшегося после введения ограничений 2020 и 2022 гг.

Показатель hh.индекса, отражающий соотношение количества активных резюме к количеству активных вакансий, в апреле 2025 г. по сфере строительства и недвижимости составил 5,9, что говорит об умеренном уровне конкуренции за рабочие места. Однако пресс-служба Минстроя сообщает, что до 2030 г. в отрасль планируется привлечь до 400 тыс. человек, что соразмерно примерно одной трети от числа занятых в настоящее время. А значит, временное улучшение ситуации на рынке труда может измениться в любой момент.

Организации строительного сектора конкурируют между собой за привлечение квалифицированных кадров на все позиции штатного расписания от рабочих до ИТР, а также сосредоточены на снижении текучести кадров, особенно из числа молодых специалистов. Трудоустройство и удержание молодежи на рабочих местах — вопрос, который регулярно освещается в научной литературе. Отечественные ученые проводят исследования в отдельных отраслях [1], регионах [2], обобщают результаты на общероссийском уровне [3]. Они уделяют пристальное внимание различным факторам, влияющим на привлечение и удержание молодых специалистов в производстве: наличие высшего и среднего профессионального образования релевантной специальности [4], соответствие реальных рабочих мест идеальным представлениям

и предпочтениям претендентов [5], психологическая поддержка профессионального самоопределения и карьерного роста во время обучения [6] и после трудоустройства, особенности мировосприятия в период высокой неопределенности 2020–2022 гг. [7].

Специалисты кадровых служб собирают собственную статистику и отмечают среди основных причин высокой текучести молодых специалистов нехватку умений и высокий темп работы. Выпускники вузов и колледжей зачастую имеют только теоретические знания, которые не позволяют выполнять работу на требуемом уровне. Особенно на это указывают работодатели строительной отрасли, где времени на доучивание новых работников немного, а ошибки могут привести к ощутимым для компании последствиям<sup>1</sup>. Частая смена организаций и поиск лучшего места работы выпускниками профессиональных учебных заведений являются следствием ряда противоречий между: 1) стремлением работать в конкретной «компании мечты» и ограниченном представлении о ее целях, миссии и корпоративной культуре; 2) сохранением work-life баланса, соблюдением границ во взаимодействии с коллегами, запросом на регламентацию работ и ожиданием снисходительного и понимающего отношения к допущенным ошибкам и проявлениям «детской» позиции в решении задач; 3) осознанием и представлением себя как креативного потенциала компании и неспособностью выполнить типовую задачу без пошаговой инструкции; 4) позиционированием себя как «цифрового поколения» и ограниченной способностью пользоваться базовыми информационными технологиями, будь то деловая переписка по e-mail или набор программ Microsoft Office; 5) заявлением о желании и готовности работать на благо компании и запросом на удаленный режим работы с ограниченным взаимодействием с руководством и коллективом [8].

<sup>1</sup> Уникальный проект наставничества в строительной отрасли России. URL: <https://expert-so.ru/pressroom/i149708?ysclid=m9dz99ff60531113187>

В сложившихся условиях адекватным инструментом, способным минимизировать большую часть противоречий, в строительных организациях представляется система наставничества. В классическом понимании наставничество предполагает передачу знания и опыта от опытного специалиста начинающему. Но в современной трактовке и практике наставничество далеко шагнуло за пределы такого утилитарного подхода. Современный наставник — это опытный сотрудник компании, который служит своеобразным посредником между организацией и молодым специалистом. Как представитель компании, он адаптирует нового работника к осуществлению трудовых функций и решению производственных задач, погружает в корпоративную культуру и особенности ее функционирования, оценивает результаты деятельности. Как «доверенное лицо» молодого коллеги, он помогает ему определить уровень компетентности, карьерную траекторию, мотивирует, поддерживает и дает конструктивную обратную связь [9].

Система наставничества доказала свою жизнеспособность и эффективность на значительном временном промежутке. Появившись в 30-х гг. XX в. в СССР, она активно развивалась и совершенствовалась до 50-х гг., а затем использовалась до распада Советского Союза. В 1970–1980 гг. наблюдался пик научного интереса к психологии наставничества. В тот период оно было массовым движением, направленным на помощь в профессиональном становлении и целенаправленное формирование личности в соответствии с идеалами социалистического общества. В советский период молодежь приходила на предприятия и в организации, как правило, на низшие должностные позиции. Наставниками для них выступали кадровые рабочие, любящие свое дело и умевшие замотивировать, заинтересовать, научить любить и уважать труд рабочих, так необходимый в строительной сфере как в советское время, так и сейчас. Именно поэтому Президент Российской Федерации В.В. Путин в своем выступлении 23.12.2013 г. отметил необходимость «...подумать, как нам возродить институт наставничества. Многие из тех, кто успешно трудится на производстве, уже проходили эту школу...»<sup>2</sup>. Так, с небольшим перерывом в нашей стране возобновились научные исследования по теме наставничества. Публикации на эту тему можно встретить в разных отраслях науки: в сфере психологии [10–12]; педагогике [13]; экономике [14]; государственной службе [15]. Исследования выполняются в различных отраслях производства [16–18], регионах [19], проводятся ретроспективный анализ отечественного опыта [20] и сравнение российских подходов с зарубежными [21–23]. Интерес к теме наставничества наблюдается и среди зарубежных авторов. В Европе,

Великобритании, США изучаются различные формы наставничества, такие как «менторская сеть», взаимное и формальное наставничество [24–27], исследуется влияние личностных особенностей наставника на его отношения с наставляемым [28], на формирование профессиональной идентичности [29].

Среди направлений научных исследований можно выделить несколько четко просматриваемых линий:

1. Исследование личностных и профессиональных качеств наставников в разрезе эффективности их деятельности. Подчеркивается важность как профессиональной компетентности, так и надпрофессиональных качеств, например самоорганизации, социально-коммуникативных и управленческих компетенций [30], аналитического склада ума и внимания к стажерам [31], адаптивности, терпения и эмпатии [32].

2. Организация и внедрение института наставничества в различных отраслях деятельности. Наибольшее число публикаций в отечественной и зарубежной научной периодике касается сферы образования [30, 33, 34]. Научные исследования в реальном секторе экономики встречаются реже: на государственной службе [35], в метрополитене [36], в ресторанном бизнесе [37], в здравоохранении [38], в органах внутренних дел [39, 40], в строительстве [41–43].

Становление системы наставничества в строительных организациях до марта 2025 г. было затруднено отсутствием необходимой законодательной и нормативной базы. На нормативном уровне наставничество упоминается в национальном проекте «Производительность труда и поддержка занятости»<sup>3</sup>, а именно в федеральном проекте «Системные меры по повышению производительности труда» на сроках реализации с 2018 по 2024 год<sup>4</sup>. В Трудовом кодексе (ТК) РФ лишь с 1 марта 2025 г. появилось понятие «наставничество» и нормы его регулирования<sup>5</sup>. В ч. 1 ст. 351.8 ТК РФ закреплено следующее определение: «Наставничество в сфере труда — это выполнение сотрудником с его письменного согласия по поручению работодателя работы по оказанию другому сотруднику помощи в овладении навыками работы на производстве и (или) рабочем месте по полученной либо получаемой другим сотрудником профессии (специальности)». Теперь организации, принявшие решение о применении наставничества в своей деятельности, должны согласовывать свои локальные нормативные акты с положениями ТК. На законодательном уровне

<sup>3</sup> Паспорт национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости». URL: <http://government.ru/info/35567/>

<sup>4</sup> Паспорт федерального проекта «Системные меры по повышению производительности труда». URL: [https://www.economy.gov.ru/material/file/524ae363fac818e54650fa78b6dfd129/FP\\_Sistemnye\\_mery\\_2024.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/524ae363fac818e54650fa78b6dfd129/FP_Sistemnye_mery_2024.pdf)

<sup>5</sup> О внесении изменения в Трудовой кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 09.11.2024 № 381-ФЗ.

<sup>2</sup> Официальный сайт Президента России. URL: <http://www.kremlin.ru>

закреплено поручение наставничества исключительно с письменного согласия сотрудника и оплата труда работника путем заключения трудового договора, дополнительного соглашения к трудовому договору или договора ГПХ. Там же прописывается размер и условия выплат за выполнение данной функции в процентах от оклада (тарифной ставки) или в фиксированной сумме. Ранее эти выплаты можно было назначить только через оформление увеличения объема работ, путем заключения дополнительного соглашения к трудовому договору, согласно ч. 1, 2 ст. 60.2 ТК РФ. Размеры и условия выплат за наставничество, согласно ТК, должны быть не меньше и не хуже, чем размеры и условия выплат за наставничество, установленные нормативными актами, соглашениями в соответствующей сфере. Например, для работников организаций ЖКХ, на которых распространяется действие отраслевого тарифного соглашения, размер надбавки наставникам должен быть не менее 10 % от размера тарифной ставки (пп. «м» п. 2.8.2.1 Федерального отраслевого тарифного соглашения в жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации на 2023–2025 годы от 12.05.2022).

Также на государственном уровне закреплено нематериальное стимулирование высококвалифицированных кадров, исполняющих функции наставников, путем получения знака отличия «Почетный наставник», утвержденного приказом Министерства труда и социальной защиты от 13.06.2018 № 382 «Методические рекомендации по внедрению ведомственных (отраслевых) знаков отличия “Почетный наставник”», а также знака отличия «За наставничество», учрежденного Указом Президента РФ от 02.03.2018 г. № 94 «Об учреждении знака отличия “За наставничество”».

Изменение подхода к наставничеству на государственном уровне создает устойчивую базу для формирования нового современного подхода к институту наставничества (который до последнего времени был приравнен к волонтерству) и определяет для него не только социальную, но и профессионально значимую роль. Эти изменения очень своевременны, поскольку ситуация, сложившаяся на рынке труда строительной сферы, требует повсеместного изменения подхода к организации процесса введения молодых специалистов в трудовую деятельность с использованием обновленных традиционных и современных инструментов, одним из которых является наставничество.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование продолжает цикл работ, посвященных анализу специфики наставничества в строительных организациях. На отечественном рынке представлен широкий спектр строительных организаций различной направленности и форм собственности. Строительными организациями считаются все общестроительные и специализированные организации, занимающиеся разработкой и проектированием

строительных проектов, инженерными изысканиями, строительством зданий, сооружений, объектов коммунального хозяйства, дорожной инфраструктуры, включая ремонтно-строительные организации, тресты (управления) механизации, буровые организации и домостроительные комбинаты. Разнообразие строительных организаций позволило сформулировать две гипотезы, положенные в основу данного исследования: 1) наличие и развитие института наставничества в организации напрямую зависит от размера компании; 2) формы наставничества определяются спецификой деятельности организации.

Для проверки гипотезы исследования в работе были использованы положения системного анализа; сравнительный анализ; анкетирование; материалы научных изданий и периодической печати; нормативно-правовые акты, относящиеся к вопросам становления и функционирования системы наставничества; ресурсы сети интернет.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Деятельность наставников в строительных организациях определяется локальным нормативным актом «Положение о наставничестве». В отличие от органов государственной службы, где действует Положение о наставничестве на государственной гражданской службе Российской Федерации, утвержденное Постановлением Правительства РФ от 07.10.2019 № 1296, или системы образования, где разработано Типовое положение о наставничестве в образовательной организации<sup>6</sup>, компании строительной сферы самостоятельно разрабатывают данный локальный нормативный акт, опираясь на ТК РФ, отраслевые соглашения, например, Отраслевое соглашение по строительству и промышленности строительных материалов Российской Федерации на 2024–2026 годы<sup>7</sup>, федеральное Отраслевое тарифное соглашение в жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации на 2023–2025 гг.<sup>8</sup>, стандарты деятельности<sup>9</sup>, Методические

<sup>6</sup> Типовое положение о наставничестве в образовательной организации. URL: [https://86nvr-larkor.gosuslugi.ru/netcat\\_files/179/3021/Nastavnichestvo\\_TP.pdf](https://86nvr-larkor.gosuslugi.ru/netcat_files/179/3021/Nastavnichestvo_TP.pdf)

<sup>7</sup> Отраслевое соглашение по строительству и промышленности строительных материалов Российской Федерации на 2024–2026 гг. URL: <https://sops96.ru/uploadedFiles/files/otraslevoy-soglashenie-stroitelstvo-i-psm--ossiia-na-2024-2026-gg.pdf>

<sup>8</sup> Федеральное Отраслевое тарифное соглашение в жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации на 2023–2025 гг. URL: <https://снк-жкх.пф/assets/uploads/docs/ots-zhkh-2023-2025.pdf?ysclid=m9h2cu8qj595375684>

<sup>9</sup> СТО СРО-10–2020. Стандарт деятельности Ассоциации об организации наставничества // Ассоциация Региональное отраслевое объединение работодателей «Сахалинское Саморегулируемое Объединение Строителей» (Ассоциация «Сахалинстрой»). URL: <https://ssros.ru/wp-content/uploads/2023/08/STO-SRO-10-Standart-o-nastavnichestve-red.1.pdf?ysclid=m9h2nfuodo402318958>

рекомендации организациям строительной отрасли по применению современных механизмов наставничества как технологии, обеспечивающей качество и стабильность кадрового потенциала отрасли при реализации программы реновации жилищного фонда в городе Москве<sup>10</sup>. Положение о наставничестве регулирует и раскрывает понятие наставничества, цели и задачи института наставников, список должностей, для которых предусмотрено наставничество, порядок назначения наставников и выбора наставляемых, права и обязанности сторон, формы и методы работы, сроки и показатели достижения результатов, а также порядок оплаты труда наставников.

На первом этапе исследования наличие Положения о наставничестве определено в качестве критерия существования в организации системы наставничества. Однако на последующих этапах вы-

явлено, что выбранные методы исследования не позволяют однозначно установить существование и применимость данного документа в строительной организации, и наличие наставничества оценивалось по факту выполнения работниками организации функций наставников.

Для проверки первой гипотезы в ходе исследования проведен анонимный опрос студентов магистратуры НИУ МГСУ о системе наставничества в строительных организациях, где они работают или проходят практику. Опросник был составлен в Yandex.формах и размещен в групповом чате одного из мессенджеров. Респонденты добровольно отвечали на вопросы анкеты в удобное время. В результате получено 164 ответа. Стаж работы респондентов от менее одного года до более пяти лет. Социально-демографические и иные качества респондентов не учитывались, поскольку они не влияли на содержание ответов. Сводные результаты опроса представлены в табл. 1.

Полученные результаты указывают на то, что наставничество используется во многих строительных компаниях (около 61 %) независимо от численности персонала. Таким образом, первая гипотеза не подтвердилась. Наличие наставничества в организации не зависит от ее численности. Оно реализуется в раз-

<sup>10</sup> Методические рекомендации организациям строительной отрасли по применению современных механизмов наставничества как технологии, обеспечивающей качество и стабильность кадрового потенциала отрасли при реализации программы реновации жилищного фонда в городе Москве. URL: <https://yablochkova.mos.ru/legislation/handbook-for-workers/Metodicheskie-rekomendatsii-po-vnedreniyu-i-razvitiyu-sistemy-nastavnichestva.pdf?ysclid=m9h2wbw7sz613809285>

Табл. 1. Представленность наставничества в строительных организациях

Table 1. Representation of mentoring in construction organizations

Размер организации Organization size		Наличие института наставничества The presence of a mentoring institute		Причастность к работе наставников Involvement in the work of mentors	
До 15 чел. включительно Up to 15 people inclusive	31	Да Yes	17	У меня был/есть наставник I had/have a mentor	13
				Я сам был/являюсь наставником I was/am a mentor myself	4
		Нет No	11	—	—
		Не знаю I don't know	3		
От 16 до 100 чел. From 16 to 100 people	52	Да Yes	29	У меня был/есть наставник I had/have a mentor	24
				Я сам был/являюсь наставником I was/am a mentor myself	5
		Нет No	20	—	—
		Не знаю I don't know	3		
От 100 до 250 чел. From 250 to 1,000 people	23	Да Yes	15	У меня был/есть наставник I had/have a mentor	9
				Я сам был/являюсь наставником I was/am a mentor myself	4
				Сам не участвовал, но точно знаю, что они есть I didn't participate myself, but I know for sure that they are	2
		Нет No	5	—	—
		Не знаю I don't know	3		



Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Размер организации Organization size		Наличие института наставничества The presence of a mentoring institute		Причастность к работе наставников Involvement in the work of mentors	
От 250 до 1000 чел. From 250 to 1,000 people	33	Да Yes	19	У меня был/есть наставник I had/have a mentor	14
				Я сам был/являюсь наставником I was/am a mentor myself	3
				Сам не участвовал, но точно знаю, что они есть I didn't participate myself, but I know for sure that they are	2
		Нет No	9	—	—
		Не знаю I don't know	5		
Более 1000 чел. More than 1,000 people	25	Да Yes	20	У меня был/есть наставник I had/have a mentor	11
				Я сам был/являюсь наставником I was/am a mentor myself	2
				Сам не участвовал, но точно знаю, что они есть I didn't participate myself, but I know for sure that they are	7
		Нет No	4	—	—
		Не знаю I don't know	1		

ных формах, не всегда подкрепляется локальными нормативными актами и материальной компенсацией, но осознается работниками. Наставничество применяется как на этапе онбординга по отношению к новым сотрудникам, так и при их переходе на более высокие должностные позиции. При приеме на работу за молодыми специалистами закрепляется наставник, а по истечении первого года работы они сами начинают выполнять роль наставника по отношению к новым сотрудникам. Более того, 3 респондента в ответах указали, что в их организации (численностью менее 15 человек) нет официально закрепляемых наставников, однако они сами осуществляют эту функцию по отношению к молодым коллегам, особенно стажерам и практикантам. Еще 2 отметили, что сами они не курируют новичков, но слышали, что по собственной инициативе это делают другие коллеги.

Почему наставничество реализуется в строительных организациях даже там, где для этого не созданы условия стимулирования и поддержки работников, готовых выступить в роли наставников? Обозначим две наиболее вероятные причины. Первая — наличие у отдельных работников внутренней мотивации к обучению, передаче знаний и опыта, проявление лидерской позиции и педагогической склонности. Быть наставником — это их внутренняя потребность, которую они удовлетворяют независимо от наличия внешних стимулов и подходящих условий корпоративной культуры. Вторая — высокий уровень зависимости результатов работы под-

разделения от вклада каждого участника. Например, в проектных командах некачественное или несвоевременное выполнение своих задач новым сотрудником будет тормозить продвижение всего проекта. В этом случае наиболее ответственный или наиболее опытный специалист добровольно или по поручению руководителя берет на себя обязанность как можно быстрее вывести новичка на необходимый уровень производительности.

При более глубоком изучении вопроса ситуация с наставничеством в строительных компаниях оказывается не настолько позитивной. По данным исследования Е.С. Назаровой, А.В. Булгакова, проведенного в 2020–2021 гг. на выборке из 37 строительных организаций г. Москвы, число наставников в них составило всего 3,5 % от общей среднесписочной численности персонала. Из них доля «рабочих-наставников — 39 %; специалистов — 41 %; руководителей — 20 %» [44]. Эти показатели свидетельствуют о наличии связи между спецификой работы, выполняемой в строительной организации, и развитием наставничества, что частично подтверждает вторую гипотезу настоящего исследования. В исследовании Е.С. Назаровой, А.В. Булгакова доля наставников среди исполнителей почти в два раза превысила их число в рядах управленческого персонала. При этом существенной разницы между высоко квалифицированными специалистами и представителями ручного труда не выявлено.

Выпускники колледжей и вузов, трудоустриваясь в строительную компанию, уже имеют фундаментальную теоретическую подготовку и одновременно минимальное представление о специфике конкретных трудовых действий. Для быстрого введения в должность им требуется «проводник», который хорошо знает особенности выполнения всего комплекса работ на конкретном рабочем месте и может помочь вчерашнему студенту быстро наработать практический опыт, необходимый для самостоятельного решения производственных задач. В связи с высокой текучестью кадров в строительной сфере и постоянной большой долей новых сотрудников на позициях рабочих и специалистов число наставников на указанных организационных уровнях должно быть значительно большим, чем на управленческом. На руководящие должности в строительных компаниях, как правило, назначаются специалисты, уже имеющие опыт практической деятельности в аналогичной сфере. Они не только освоили и могут хорошо выполнять должностные обязанности, но также обладают управленческими и лидерскими качествами, вероятно, прошли обучение в школе карьерного резерва или имели возможность освоить

часть управленческих функций в результате делегирования полномочий от руководителя на предыдущем месте работы. Им, безусловно, также требуется наставник. Но, поскольку число управленцев существенно меньше числа исполнителей, их работа предполагает самостоятельность в принятии решений и творческий подход, наставник новому руководителю необходим в меньшем объеме времени, нежели специалисту или рабочему производства.

В зависимости от содержания деятельности наставника, предъявляемых к нему требований, характеристики наставляемых и их трудовых функций можно выделить несколько форм наставничества, применение которых целесообразно в строительных компаниях (табл. 2). Отметим, что ввиду отсутствия единой терминологии каждая организация вправе и вынуждена самостоятельно определять наименование этих форм.

Независимо от формы и целевой функции наставничества требования к личности наставника практически идентичны для всех категорий. Это, прежде всего, высокий профессионализм в той сфере, в которой человек становится наставником (желательно на 1–2 уровня выше, чем позиция на-

Табл. 2. Формы наставничества, применяемые в строительных компаниях

Table 2. Forms of mentoring used in construction companies

Наименование формы наставничества Name of the mentoring form	Целевая функция наставничества The target function of mentoring	Целевая аудитория и характер трудовых функций наставляемых The target audience and the nature of the mentors' work functions
1. Инструктор (индивидуальный/ групповой) Instructor (individual/group)	Базовое обучение новых сотрудников технике выполнения трудовых операций на рабочих местах Basic training of new employees in the technique of performing labour operations in the workplace	Новые работники организации без специального образования и опыта работы, стажеры и выпускники среднего профессионального образования (СПО), принятые для выполнения ручного труда или с применением простых машин и механизмов New employees of the organization without special education and work experience, trainees and graduates of vocational training, accepted to perform manual labour or using simple machines and mechanisms
2. Мастер-технолог (индивидуальный/ групповой) Master technologist (individual/group)	Обучение сотрудников на рабочих местах с целью повышения их квалификации, расширения профессионального кругозора по разным аспектам трудовой деятельности On-the-job training for employees in order to improve their skills and broaden their professional horizons in various aspects of work	Работники, которым требуется освоение новых или высокотарифицируемых видов работ, требующих специальных умений и навыков; технологи строительного производства, главные и ведущие специалисты Employees who need to master new or highly qualified types of work that require special skills; construction production technologists, main and leading specialists
3. Эксперт (групповой) Expert (group)	Оценка квалификации сотрудников, выдвигаемых в кадровый резерв, с целью представления руководства объективной характеристики деловых качеств кандидата Assessment of the qualifications of employees nominated to the personnel reserve in order to provide management with an objective description of the candidate's business qualities	Сотрудники с опытом работы более двух лет, имеющие выдающиеся результаты трудовой деятельности в инженерно-технической или административно-управленческой деятельности Employees with more than 2 years of work experience who have outstanding work results in engineering, technical or administrative management activities

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Наименование формы наставничества Name of the mentoring form	Целевая функция наставничества The target function of mentoring	Целевая аудитория и характер трудовых функций наставляемых The target audience and the nature of the mentors' work functions
4. Визионер (индивидуальный/ групповой) Visionary (individual/group)	Содействие профессиональному росту руководителей высшего звена для решения стратегических целей организации Promoting the professional growth of senior managers in order to achieve the strategic goals of the organization	Руководители высшего звена, непосредственно влияющие на достижение стратегических задач компании Senior managers who directly influence the achievement of the company's strategic objectives
5. Руководитель в роли наставника (как правило, индивидуальный) The head in the role of mentor (usually individual)	Руководство и введение в должность нового сотрудника во вверенном руководителю подразделении Leadership and appointment of a new employee in the department entrusted to the head of the department	Новые работники различных категорий, а также те, кто сменил место работы. Функционал различается в зависимости от специфики подразделения New employees of various categories, as well as those who have changed jobs. The functionality varies depending on the specifics of the department
6. Консультант Consultant	Руководство практикой, стажировкой обучающихся колледжей и вузов, руководство курсовым и дипломным проектированием обучающихся с целью профориентации, отбора и привлечения перспективных молодых специалистов в организацию Practice management, internship of students of colleges and universities, management of course and diploma design of students for the purpose of career guidance, selection and attraction of promising young specialists to the organization	Обучающиеся образовательных учреждений СПО и высшего профессионального образования, потенциальные работники организации, выполняющие трудовые функции в соответствии с содержанием образовательной программы Students of vocational and vocational education institutions, potential employees of the organization who perform labour functions in accordance with the content of the educational programme

ставляемого); доброжелательность, умение доходчиво объяснять, стрессоустойчивость, позитивная мотивация к передаче собственных знаний и опыта. Во всех случаях, за исключением формы 5, наставник не является прямым руководителем наставляемого, что создает более доверительные отношения, снижает тревожность со стороны наставляемого по поводу допущенных ошибок и предвзятость со стороны руководителя, основная функция которого — достижение подразделением установленных показателей.

Формы наставничества, представленные в табл. 2, хорошо отражают специфику деятельности строительных организаций в целом и отдельных категорий работников, в отношении которых применяется наставничество. Однако она не дает представления о возможной связи данных форм работы с размером организации. Результаты проведенного в данном исследовании опроса показали, что крупные и средние организации строительной отрасли в разном сочетании используют все представленные формы. В то время как в малых и микроорганизациях встречается наставничество в форме непосредственного обучения трудовым действиям (наставник-инструктор), обучения сложным и новым видам работ (наставник-мастер), введение в должность непосредственным руководителем (руководитель-наставник)

и руководство практикантами/стажерами (наставник-консультант). Наиболее распространенный срок наставничества 1–3 месяца. В качестве основной причины такого положения дел видится непостоянство кадрового состава (кроме, вероятно, управленческих должностей) и его малочисленность. Большинство малых и микропредприятий имеют узкопрофильную специфику деятельности и небольшое количество уровней должностной иерархии, что делает некоторые формы наставничества невостребованными (например, наставник-эксперт и наставник-визионер). Также возможным фактором может являться специфика деятельности наставника: выполнение дополнительных функций без отрыва от основной деятельности и уменьшения ее объема. Принимая на себя наставничество молодых коллег, специалист строительной компании понимает, что тем самым он увеличивает свои трудовые затраты, а также вынужден выделять дополнительное время для взаимодействия с наставляемым, выяснения его уровня компетентности, регулярного мониторинга динамики освоения новых навыков, моральной и профессиональной поддержки, составления персонального плана развития и заполнения отчетности (при необходимости). Если в организации система наставничества закреплена на нормативном уровне с предоставлением поддержки и материальной компенсации, то такое повышение

нагрузки становится понятным. А если, как отмечали наши респонденты, в организации не выстроена система наставничества? Какую выгоду получает работник, проявивший инициативу или согласившийся на просьбу руководителя стать наставником?

Специалист строительной компании, беря на попечение молодых специалистов, понимает, что у него возрастут временные и трудовые затраты. Ему требуется выяснить, какими навыками обладает подопечный, и чему еще его необходимо обучить, следить за качеством исполнения заданий, контролировать выполнение персональных планов развития и т.д. Несмотря на дополнительную нагрузку наставник все же приобретает выгоду от данной деятельности. У него появляется возможность развить свои управленческие навыки, постоянно актуализировать профессиональные знания и опыт не только в своей, но и в смежных видах деятельности, посмотреть с другого ракурса на пути решения производственных задач и, возможно, найти более эффективный способ их выполнения, сформировать вокруг себя команду профессионалов со схожими ценностями и подходом к работе, получить определенный социальный статус и признание коллег.

Таким образом, выгоду от реализации наставничества в строительной компании получают сразу несколько сторон:

- наставляемый сотрудник получает актуальную и своевременную помощь на этапе адаптации, моральную и профессиональную поддержку и снижение неопределенности и тревожности;
- наставник развивает управленческие и социальные компетенции, участвует в формировании команды, поднимает свой авторитет и статус в глазах коллег, улучшает материальное положение (за счет компенсационных выплат);
- служба управления персоналом получает в распоряжение мощный поддерживающий ресурс, способствующий достижению социальных целей компании, сокращает затраты на подбор, трудоустройство и обучение сотрудников за счет снижения текучести кадров, оптимизирует рабочее время руководителей;
- организация формирует лояльный трудовой коллектив высококомпетентных сотрудников, стабилизирует численность персонала, повышает уровень профессионализма компании в целом, формирует привлекательный HR-бренд на рынке труда.

Но для этого необходимо, чтобы наставники обладали высоким уровнем компетентности и ответственности, были профессионалами в своей основной деятельности и немного педагогами-воспитателями. Безусловно, далеко не все сотрудники соответствуют этим критериям. Ключевыми показателями для компании являются: качество наставничества и добросовестное отношение к выполняемым обязанностям. Именно поэтому наставничество в строительных организациях должно иметь вид системы, а не отдельных инициатив. Компании, ко-

торые только вводят систему наставничества, могут вначале опираться на добровольцев или сотрудников, личностные качества которых максимально соответствуют описанным выше требованиям. Материальная компенсация их затрат в соответствии со ст. 351.8 ТК РФ будет для них приятной поддержкой и мотивирующим фактором для всех новых участников. Привлечение на позиции наставников специалистов предпенсионного возраста позволит избежать кадрового разрыва. Учитывая специфику и менталитет старшего поколения, сложность межпоколенческого диалога, а также необходимость при составлении пар «наставник – наставляемый» учитывать их психологическую совместимость [45], желательно предоставить таким работникам возможность выбирать наставляемых, которым они готовы передать свой уникальный, наработанный годами опыт. Таким образом строительная организация может создать базовую команду наставников, которая станет основой всей системы наставничества. Наставничество, как и педагогическая деятельность, — это, прежде всего, набор простых и понятных действий, мастерство в сфере обучения и социализации, а не врожденный дар. Следовательно, наставников нужно обучать на специальных курсах и тренингах, в процессе обмена опытом и лучшими практиками с собственным наставником и друг другом. Естественно, что процесс наставничества не должен мешать основной работе, что достигается за счет правильной организации труда и соразмерного сокращения нагрузки специалистов, выполняющих функции наставников.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наставничество в организациях строительной сферы представляет собой перспективное направление содействия адаптации молодых специалистов и новых сотрудников. Полевое исследование показало, что элементы наставничества сейчас присутствуют во многих строительных организациях независимо от их численности и усилий руководства по созданию систематической работы опытных специалистов с новыми сотрудниками.

Проведенное исследование показало, что отсутствие правового обеспечения деятельности наставников (до марта 2025 г.) и единой научно-терминологической базы привело к фрагментарному и ситуативному использованию наставничества в строительных организациях на этапе адаптации молодых специалистов, что ведет к высокой текучести кадров, недопустимой в условиях кадрового дефицита на рынке труда и перспектив развития строительной отрасли в целом.

Результаты опроса продемонстрировали, что факт реализации наставничества не зависит от численности строительной организации, но зависит от формы применяемого наставничества. В средних и крупных строительных компаниях их число больше, а перечень и содержание разнообразнее, нежели в малых.



Данная работа может получить продолжение в виде полномасштабного исследования системы наставничества в строительных компаниях, результатом которого будет являться описание различных моделей

наставничества для организаций различной численности и специфики деятельности, а также методические рекомендации по внедрению той или иной модели с учетом специфики конкретной организации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коленникова О.А., Токсанбаева М.С. Занятость в значимых отраслях экономики с точки зрения возможностей трудовой мобильности // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 11–1 (57). С. 234–238. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11336. EDN SLRYMA.
2. Ярашева А.В. Трудовые ресурсы молодежи: актуальные региональные проблемы // Экономика и управление. 2019. № 11 (169). С. 53–58. DOI: 10.35854/1998-1627-2019-11-53-58. EDN TUDFOB.
3. Кочерга С.Ю. Трудоустройство молодежи: особенности, проблемы, пути решения // Вестник экспертного совета. 2021. № 4 (27). С. 52–57. EDN HFLIOB.
4. Zubok Ю.А., Чупров В.И. Молодые специалисты: подготовка и востребованность на рынке труда // Социологические исследования. 2015. № 5 (373). С. 114–122. EDN RUWMPM.
5. Каргаполова Е.В., Давыдова Ю.А., Ивлева М.И., Аксютин И.В. Перспективы трудоустройства в представлениях выпускников вузов Москвы (по результатам стратегических сессий) // ЦИТИСЭ. 2023. № 4 (38). С. 187–199. DOI: 10.15350/2409-7616.2023.4.18. EDN WQXFYC.
6. Люсова О.В., Солянкина Л.Е. Психологическая поддержка формирования карьерных стратегий современной молодежи на этапе профессионального обучения // Психолого-педагогический поиск. 2020. № 1 (53). С. 35–44. DOI: 10.37724/RSU.2020.53.1.006. EDN TBPGQI.
7. Александрова О.А., Проскурина А.С., Марков Д.И. Первое столкновение с «черным лебедем»: как пандемия влияла на настроения выпускников вузов // Народонаселение. 2023. Т. 26. № 1. С. 187–200. DOI: 10.19181/population.2023.26.1.15. EDN VADNJA.
8. Марков Д.И. Представления городской молодежи о карьерных возможностях и отношениях в сфере труда // Народонаселение. 2024. Т. 27. № 4. С. 128–139. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-4-128-139. EDN OTXZWR.
9. Елисеева Е.В., Петухова Л.П., Савин А.В. Современные модели наставничества в практике обучения и развития молодого специалиста для цифровой экономики // Добровольчество и наставничество: путь к «сбережению народа»: мат. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2023. С. 83–86. EDN QDVCFD.
10. Климов Е.А. Психология профессионала: избранные психологические труды. М.: Академия, 2004. 387 с.
11. Осипов П.Н., Ирисметова И.И. Наставничество как объект научных исследований // Профессиональное образование и рынок труда. 2020. № 2. С. 109–115. DOI: 10.24411/2307-4264-2020-10234. EDN EAFENS.
12. Чарина Е.В. Отношения в системе «наставник – молодой специалист» в процессе профессионализации: дис. ... канд. психол. наук. М., 2004. 160 с.
13. Черникова Е.А. Наставничество как средство сопровождения профессионально-личностного становления специалиста социальной службы: дис. ... канд. пед. наук. Волгоград, 2013. 200 с. EDN SUUYQL.
14. Теплов А.О. Методы оценки эффективности наставничества // Государственное управление. Электронный вестник. 2011. № 28. С. 16. EDN OIWODX.
15. Беляев А.М., Богатырев Е.Д., Галкин А.И., Еремин С.Г., Иванов А.В., Кадырова Г.М. и др. Современные кадровые технологии в органах власти: монография. М.: Юстицинформ, 2015. 662 с. EDN UYZCYJ.
16. Галимова А.Ш., Поколова М.В. Методы наставничества, применяемые в современных компаниях // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 1–1 (95). С. 87–91. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-1-1-87-91. EDN TSKCHY.
17. Добрых М.О. Социально-психологические аспекты изучения системы внедрения наставничества на предприятии // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2007. Т. 14. № 37. С. 62–65. EDN KVQTMV.
18. Таныгина М.И. Анализ зарубежной и отечественной практики наставничества на предприятиях нефтегазовой отрасли // Вопросы студенческой науки. 2023. № 11 (87). С. 21–25. EDN JPBLPB.
19. Тераз В.А. Применение технологии адаптации персонала «наставничество» на предприятиях Удмуртской Республики: проблемы и пути их решения // Наука Удмуртии. 2022. № 2 (97). С. 171–181. EDN LAJYFQ.
20. Яковкина А.О. История наставничества в России // Вестник науки. 2023. Т. 1. № 5 (62). С. 215–221. EDN TKTIEE.

21. Шкунов В.Н. Технология наставничества в России и в странах Востока: сравнительный анализ // Проблемы и тенденции научных преобразований в условиях трансформации общества : сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 41–45. EDN BYEXMB.

22. Игнатьева Е.В. Ретроспектива наставничества в России и США // Пространство и время в диалоге педагогических культур: интерсубъективность историко-педагогического понимания : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — XXXIV сессии Научного совета по проблемам истории образования и педагогической науки при отделении философии образования и теоретической педагогики Российской академии образования. 2021. С. 140–143. EDN AJXDRK.

23. Габдулгалимова Л.С., Троя Д.В. Наставничество на первом курсе обучения: обзор и сравнение практик России и США // Наука и школа. 2021. № 3. С. 101–108. DOI: 10.31862/1819-463X-2021-3-101-108. EDN NDOIVD.

24. Wyre D.C., Gaudet C.H., McNeese M.N. So You Want to Be a Mentor? An Analysis of Mentor Competencies // Mentoring & Tutoring: Partnership in Learning. 2016. Vol. 24. Issue 1. Pp. 73–88. DOI: 10.1080/13611267.2016.1165490

25. Jones J. How can mentoring support women in a male-dominated workplace? A case study of the UK police force // Palgrave Communications. 2017. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1057/palcomms.2016.103

26. Baran M. Mutual mentoring as a tool for managing employees of different generations in the enterprise // Journal of Positive Management. 2014. Vol. 5. Issue 2. P. 20. DOI: 10.12775/JPM.2014.010

27. Shen M. A Review of the Literature on Enterprise Mentoring: A Perspective of Social Capital Theory // Open Journal of Business and Management. 2020. Vol. 8. Issue 2. Pp. 892–901. DOI: 10.4236/ojbm.2020.82055

28. Kumari K., Ali S.B., Batool M., Cioca L.I., Abbas J. The interplay between leaders' personality traits and mentoring quality and their impact on mentees' job satisfaction and job performance // Frontiers in Psychology. 2022. Vol. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.937470

29. Venktaramana V., Ong Y.T., Yeo J.W., Pisupati A., Krishna L.K.R. Understanding mentoring relationships between mentees, peer and senior mentors // BMC Medical Education. 2023. Vol. 23. Issue 1. DOI: 10.1186/s12909-023-04021-w

30. Ризенко М.А., Возилова Е.В. Наставник профессиональной образовательной организации: компетенции и личностные качества // Инновационное развитие профессионального образования. 2024. № 1 (41). С. 114–120. EDN SLFVUX.

31. Душкин А.С., Гончарова Н.А., Коноплева И.Н., Костина Л.Н., Ковальчук И.А. Особенности профессиональных компетенций наставников и меж-

личностных отношений наставников и стажеров в системе МВД России // Психология и право. 2022. Т. 12. № 1. С. 54–66. DOI: 10.17759/psylaw.2022120105. EDN NUORMP.

32. Баянов Д.И. Ключевые soft-компетенции инженеров авиастроительной отрасли в их наставнической деятельности // XXII Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей образования. 2023. С. 319.

33. Еремина А.А. Роль наставника в формировании профессиональных компетенций молодого учителя // Инновационная научная современная академическая исследовательская траектория (ИНСАЙТ). 2022. № 4 (12). С. 62–74. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-4-62-74. EDN XOSZDI.

34. Пирязева Т.В., Соколов И.В., Герасименко И.И. Роль педагога и наставника в формировании профессиональных компетенций у студентов // Информатизация образования и науки. 2023. № 4 (60). С. 149–156. EDN WFXVUZ.

35. Папчихина В.В. Роль наставничества в развитии профессиональных компетенций молодых специалистов на государственной службе // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 2 (83). С. 301–309. EDN IGQKKN.

36. Посадский А.В. Психолого-педагогическая подготовка наставников эксплуатационных служб ГУП «Московский метрополитен» в Корпоративном университете Транспортного комплекса // Психология образования в поликультурном пространстве. 2023. № 2 (62). С. 83–90. DOI: 10.24888/2073-8439-2023-62-2-83-90. EDN LCZAVQ.

37. Ден В.Г., Малко В.В. Система наставничества в рамках подготовки кадров в ресторанном бизнесе // Балтийский гуманитарный журнал. 2023. Т. 12. № 3 (44). С. 31–36. DOI: 10.57145/27129780\_2023\_12\_03\_06. EDN SZNKGG.

38. Бурдастова Ю.В. Проблемы формализации института наставничества в здравоохранении и пути их решения // Здравоохранение Российской Федерации. 2021. Т. 65. № 5. С. 461–466. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-5-461-466. EDN YLBBDN.

39. Сардак Д.Б. Актуальные проблемы института наставничества в системе органов внутренних дел // Закон и право. 2021. № 3. С. 96–99. DOI: 10.24412/2073-3313-2021-3-96-99. EDN CEUJMY.

40. Кравцова Е.А., Полозов С.А. Формирование института наставничества в системе органов внутренних дел // Проблемы правоохранительной деятельности. 2021. № 3. С. 33–37. EDN JVNLWA.

41. Плутова М.И., Попова О.Ю. Формирование системы наставничества в строительных организациях // Ученые записки Тамбовского отделения РСОМУ. 2022. № 27. С. 86–92. EDN TJDTFD.

42. Тихонова Н.В. Разработка системы нематериальной мотивации для менеджеров инвестиционно-

строительных проектов // Экспериментальная наука: механизмы, трансформации, регулирование : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 165–168. EDN ALOLQO.

43. Малышева Е., Мальцева С.М. Развитие системы наставничества в процессе подготовки кадров на примере компании ООО «Новая» // VI Всероссийский фестиваль науки и техники : сб. мат. Вып. 5. 2023. С. 239–245.

44. Назарова Е.С., Булгаков А.В. Психологическое моделирование личностно-профессиональной

эффективности деятельности наставника в строительной организации // Человеческий капитал. 2022. № 2 (158). С. 151–158. DOI: 10.25629/НС.2022.02.16. EDN YXUHAC.

45. Перевалова О.С., Баркалов С.А., Калинина Н.Ю., Батракова Д.Н. Модель закрепления ученика за наставником в системе обучения персонала организации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21. № 2. С. 92–101. DOI: 10.14529/ctcr210209. EDN TPJВТО.

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 17 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Валерьевна Романова — кандидат психологических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7072-2090, РИНЦ ID: 655668, Scopus: 56825341800, ResearcherID: ABH-1246-2020, ORCID: 0000-0002-0225-6435; RomanovaEV@mgsu.ru;

Динара Римовна Хаирова — кандидат экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики нефти и газа; **Филиал Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте (Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте))**; 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улутбекский район, ул. Дурмон йули, д. 34/34, Республика Узбекистан; SPIN-код: 4610-3020, РИНЦ ID: 1044283, ORCID: 0000-0001-5160-7716; dhairova@mail.ru.

Вклад авторов:

Романова Е.В. — концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке анкеты и проведение опроса, анализ и обработка результатов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Хаирова Д.Р. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kolennikova O.A., Toksanbaeva M.S. Employment in significant sectors of economy from the point of view of opportunities of labor mobility. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2019; 11-1(57):234-238. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11336. EDN SLRYMA. (rus.).

2. Yarasheva A.V. Youth workforce: current regional problems. *Economics and Management*. 2019; 11(169):53-58. DOI: 10.35854/1998-1627-2019-11-53-58. EDN TUDFOB. (rus.).

3. Kocherga S. Employment of youth: features, problems, ways of solution. *Bulletin of the Expert Council*. 2021; 4(27):52-57. EDN HFLIOB. (rus.).

4. Zubok Yu.A., Chuprov V.I. Young specialists, training and demand in the labor market. *Sociological Research*. 2015; 5(373):114-122. EDN RUWMPM. (rus.).

5. Kargapolova E.V., Davydova Yu.A., Ivleva M.I., Aksyutina I.V. Employment prospects in the views of graduates of Moscow universities (based on the results of strategic sessions). *CITISE*. 2023; 4(38):187-199. DOI: 10.15350/2409-7616.2023.4.18. EDN WQXFYC. (rus.).

6. Lyusova O.V., Solyankina L.Y. Psychological support for career development in modern adolescents at the stage of vocational education. *Psychological and Pedagogical Search*. 2020; 1(53):35-44. DOI: 10.37724/RSU.2020.53.1.006. EDN TBPGQI. (rus.).

7. Aleksandrova O.A., Proskurina A.S., Markov D.I. The first encounter with “the black swan”: how the pandemic affects the mood of graduates. *Population*. 2023; 26(1):187-200. DOI: 10.19181/population.2023.26.1.15. EDN VADNJA. (rus.).

8. Markov D.I. Urban youth’s views about career opportunities and relations in the field of labor. *Population*. 2024; 27(4):128-139. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-4-128-139. EDN OTXZWR. (rus.).

9. Eliseeva E.V., Petukhova L.P., Savin A.V. Modern models of mentoring in the practice of training and development of a young specialist for the digital economy. *Volunteerism and mentoring: the path to “saving the people” : materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 2023; 83-86. EDN QDVCFD. (rus.).



10. Klimov E.A. *Professional Psychology: Selected psychological works*. Moscow, Academy, 2004; 387. (rus.).
11. Osipov P., Irismetova I. Mentoring as an object of scientific research. *Vocational Education and Labour Market*. 2020; 2:109-115. DOI: 10.24411/2307-4264-2020-10234. EDN EAFFNS. (rus.).
12. Charina E.V. *Relations in the mentor-young specialist system in the process of professionalization : thesis ... candidate of psychological sciences*. Moscow, 2004; 160. (rus.).
13. Chernikova E.A. *Mentoring as a means of accompanying the professional and personal development of a social service specialist : thesis ... candidate of pedagogical sciences*. Volgograd, 2013; 192. EDN SUUYQL. (rus.).
14. Teplov A.O. Methods for evaluating the effectiveness of mentoring. *E-journal Public Administration*. 2011; 28:16. EDN OIWODX. (rus.).
15. Belyaev A.M., Bogatyrev E.D., Galkin A.I., Eremin S.G., Ivanov A.V., Kadyrova G.M. et al. *Modern personnel technologies in government bodies : monograph*. Moscow, Yustitsinform, 2015; 662. EDN UYZCYJ. (rus.).
16. Galimova A.Sh., Pokolova M.V. Mentoring methods, used in modern companies. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2023; 1-1(95):87-91. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-1-1-87-91. EDN TSKCHY. (rus.).
17. Dobrykh M.O. Social and psychological aspects of studying the system of mentoring implementation at the enterprise. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2007; 14(37):62-65. EDN KVQTMV. (rus.).
18. Tanygina M.I. Analysis of foreign and domestic mentoring practices at oil and gas industry enterprises. *Questions of Student Science*. 2023; 11(87):21-25. EDN JPBLPB. (rus.).
19. Teraz V.A. Application of personnel adaptation technology "mentoring" at the enterprises of the Udmurt Republic: problems and ways to solve them. *Science of Udmurtia*. 2022; 2(97):171-181. EDN LAJYFQ. (rus.).
20. Yakovkina A.O. The history of mentoring in Russia. *Bulletin of Science*. 2023; 1(5):(62):215-221. EDN TKTIEE. (rus.).
21. Shkunov V.N. Mentoring technology in Russia and in the countries of the east: comparative analysis. *Problems and trends of scientific transformations in the context of social transformation : a collection of articles based on the results of the International scientific and practical conference*. 2024; 41-45. EDN BYEXMB. (rus.).
22. Ignatyeva E.V. Entoring retrospective in Russia and USA. *Space and time in the dialogue of pedagogical cultures : intersubjectivity of historical and pedagogical understanding: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference — XXXIV session of the Scientific Council on the problems of the history of education and pedagogical science at the department of philosophy of education and theoretical pedagogy of the Russian Academy of Education*. 2021; 140-143. EDN AJXDRK. (rus.).
23. Gabdulgalimova L.S., Troya D.V. Mentoring in the first year of studying: an overview and comparison of practices in Russia and the United States. *Science and School*. 2021; 3:101-108. DOI: 10.31862/1819-463X-2021-3-101-108. EDN NDOIVD. (rus.).
24. Wyre D.C., Gaudet C.H., McNeese M.N. So You Want to Be a Mentor? An Analysis of Mentor Competencies. *Mentoring & Tutoring: Partnership in Learning*. 2016; 24(1):73-88. DOI: 10.1080/13611267.2016.1165490
25. Jones J. How can mentoring support women in a male-dominated workplace? A case study of the UK police force. *Palgrave Communications*. 2017; 3(1). DOI: 10.1057/palcomms.2016.103
26. Baran M. Mutual mentoring as a tool for managing employees of different generations in the enterprise. *Journal of Positive Management*. 2014; 5(2):20. DOI: 10.12775/JPM.2014.010
27. Shen M. A Review of the Literature on Enterprise Mentoring: A Perspective of Social Capital Theory. *Open Journal of Business and Management*. 2020; 8(2):892-901. DOI: 10.4236/ojbm.2020.82055
28. Kumari K., Ali S.B., Batool M., Cioca L.I., Abbas J. The interplay between leaders' personality traits and mentoring quality and their impact on mentees' job satisfaction and job performance. *Frontiers in Psychology*. 2022; 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.937470
29. Venktaramana V., Ong Y.T., Yeo J.W., Pisupati A., Krishna L.K.R. Understanding mentoring relationships between mentees, peer and senior mentors. *BMC Medical Education*. 2023; 23(1). DOI: 10.1186/s12909-023-04021-w
30. Rizenko M.A., Vozilova E.V. Mentor of a professional educational organization: competencies and personal qualities. *Innovative Development of Vocational Education*. 2024; 1(41):114-120. EDN SLFVUX. (rus.).
31. Dushkin A., Goncharova N.A., Konopleva I.N., Kostina L.N., Kovalchuk I.A. The peculiarities of tutors' professional competences and interpersonal relationships between tutors and interns in the system of the ministry of the interior of Russia. *Psychology and Law*. 2022; 12(1):54-66. DOI: 10.17759/psylaw.2022120105. EDN NUORMP. (rus.).
32. Bayanov D.I. Key soft competencies of aircraft industry engineers in their mentoring activities. *XXII International Scientific and Practical Conference of Young Educational Researchers*. 2023; 319. (rus.).
33. Eremina A.A. The mentor's role in forming young teacher's professional competences. *Insight*. 2022; 4(12):62-74. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-4-62-74. EDN XOSZDI. (rus.).
34. Piryazeva T.V., Sokolov I.V., Gerasimenko I.I. The role of the teacher and mentor in the forma-



tion of professional competences in students. *Information of Education and Science*. 2023; 4(60):149-156. EDN WFXVUZ. (rus.).

35. Papchikhina V.V. The role of mentoring in the development of professional competences of young specialists in the civil service. *Science Bulletin*. 2025; 3(2):(83):301-309. EDN IGQKKH. (rus.).

36. Posadsky A.V. Psychological and pedagogical training of mentors of operational services into the transport corporate university sue “Moscow metro”. *Psychology of Education in Multicultural Space*. 2023; 2(62):83-90. DOI: 10.24888/2073-8439-2023-62-2-83-90. EDN LCZAVQ. (rus.).

37. Den V.G., Malko V.V. Mentoring system as part of training in the restaurant business (Vladivostok). *Baltic Humanitarian Journal*. 2023; 12(3):(44):31-36. DOI: 10.57145/27129780\_2023\_12\_03\_06. EDN SZNKGG. (rus.).

38. Burdastova Yu.V. Problems of formalization of the mentoring institute in healthcare and ways of solving them. *Health Care of the Russian Federation*. 2021; 65(5):461-466. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-5-461-466. EDN YLBBDN. (rus.).

39. Sardak D.B. Actual problems of the institute of mentoring in the system of internal affairs bodies. *Law and Right*. 2021; 3:96-99. DOI: 10.24412/2073-3313-2021-3-96-99. EDN CEUJMY. (rus.).

40. Kravtsova E.A., Polozov S.A. Formation of the institute of mentoring in the system of the internal

affairs. *Problems of law-enforcement activity*. 2021; 3:33-37. EDN JVNLWA. (rus.).

41. Plutova M.I., Popova O.Yu. Formation of a mentoring system in construction organizations. *Scientific notes of the Tambov branch of RoSMU*. 2022; 27:86-92. EDN TJDTFD. (rus.).

42. Tikhonova N.V. Development of a system of non-material motivation for managers of investment and construction projects. *Experimental science: mechanisms, transformations, regulation : collection of articles from the International scientific and practical conference*. 2022; 165-168. EDN ALOLQO. (rus.).

43. Malysheva E., Mal'tseva S.M. The development of a mentoring system in the process of personnel training using the example of Nova LLC. *VI All-Russian Festival of Science and Technology : collection of materials*. Vol. 5. 2023; 239-245. (rus.).

44. Nazarova E.S., Bulgakov A.V. Psychological modeling of personal and professional efficiency of a mentor in a construction organization. *Human Capital*. 2022; 2(158):151-158. DOI: 10.25629/HC.2022.02.16. EDN YXUHAC. (rus.).

45. Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. Model for assigning a pupil to a mentor in the staff training system of the organization. Bulletin of the South Ural State University. *Series Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021; 21(2):92-101. DOI: 10.14529/ctcr210209. EDN TPJBTO. (rus.).

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on May 15, 2025.

Approved for publication on June 17, 2025.

**B I O N O T E S :** **Elena V. Romanova** — Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7072-2090, ID RSCI: 655668, Scopus: 56825341800, ResearcherID: ABH-1246-2020, ORCID: 0000-0002-0225-6435; RomanovaEV@mgsu.ru;

**Dinara R. Khairova** — Candidate of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Oil and Gas Economics; **Branch of Russian State University of Oil and Gaz (National Research University) named after I.M. Gubkin in Tashkent**; 34/34 Durmon Yuli st., Mirzo-Ulugbek district, Tashkent, 100125, Republic of Uzbekistan; SPIN-code: 4610-3020, ID RSCI: 1044283, ORCID: 0000-0001-5160-7716; dhairova@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Elena V. Romanova — research concept, methodology development, participation in the development of the questionnaire and survey, analysis and processing of results, writing the source text, final conclusions.*

*Dinara R. Khairova — methodology development, revision of the text, final conclusions.*

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

Сценарно-ориентированное проектирование объектов  
строительства в проектах комплексного развития территорий

Азарий Абрамович Липидус, Любовь Андреевна Адамцевич  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

**Введение.** Разработка проекта комплексного развития территории (КРТ) является длительным трудоемким процессом, который можно автоматизировать с использованием цифровых технологий. Цель исследования — разработка сценарно-ориентированного подхода к проектированию объектов строительства в проектах КРТ и его автоматизация с применением языка программирования Python.

**Материалы и методы.** Сценарно-ориентированный подход к проектированию объектов строительства в проектах КРТ осуществлен через три ключевых направления: комплексное развитие территории жилой застройки; комплексное развитие не жилой застройки; комплексное развитие незастроенной территории. Базой для разработки программного модуля «Проект КРТ» стала нормативная документация, действующая на территории РФ.

**Результаты.** Разработан программный модуль «Проект КРТ» для расчета параметров объектов и стоимости проектов по трем основным сценариям, который учитывает региональные коэффициенты стоимости, нормативы плотности застройки, нормативные требования к социальной инфраструктуре. Полученное решение сохраняется в детализированном отчете в формате \*.xlsx. Разработанное программное решение является гибким и может быть адаптировано под любые требования и изменения нормативных документов.

**Выводы.** Применение представленного подхода позволит сократить сроки разработки проектов КРТ с учетом особенностей застраиваемой территории, а предлагаемый программный модуль может быть адаптирован под новые нормативные требования при необходимости. В то же время традиционный подход рассматривает объекты КРТ как изолированные элементы, что нарушает системотехнические принципы эмерджентности и иерархичности, что приводит к необходимости разработки новых подходов для оценки автономности объектов строительства в проектах КРТ. Разработка методологии оценки автономности переведет проектирование КРТ на принципиально новый уровень, в котором будет выполнен переход от изолированных объектов к синергетическим комплексам с динамическим моделированием их жизненного цикла. Данному вопросу будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** КРТ, комплексное развитие территорий, управление жизненным циклом, объект строительства, сценарно-ориентированное проектирование, устойчивое развитие, инженерная инфраструктура, социальная инфраструктура, жилая застройка

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Липидус А.А., Адамцевич Л.А. Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития территорий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1278–1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291

Автор, ответственный за переписку: Любовь Андреевна Адамцевич, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

Scenario-oriented design of construction projects in integrated  
territorial development projects

Azariy A. Lapidus, Liubov A. Adamtsevich  
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

**Introduction.** The aim of the paper is to develop a scenario-oriented approach to the design of construction projects in integrated territorial development projects.

**Materials and methods.** The scenario-oriented approach to designing construction projects in complex development of the territory (CDT) projects will be implemented through three key areas: integrated development of residential development areas; integrated development of non-residential development; integrated development of undeveloped areas. The basis for developing the CDT Project software module was the regulatory documentation in force in the Russian Federation.

**Results.** The software module “Project CDT” was developed for calculating the parameters of objects and the cost of projects according to three main scenarios, which takes into account regional cost coefficients, standards for building density, and regulatory requirements for social infrastructure. The resulting solution is saved in a detailed report in \*.xlsx format. The developed software solution is flexible and can be adapted to any requirements and changes in regulatory documents.

**Conclusions.** The application of the presented approach will reduce the time for developing CDT projects considering the characteristics of the developed territory, and the proposed software module can be adapted to new regulatory requirements if necessary. At the same time, the traditional approach considers CDT objects as isolated elements, which violates the system engineering principles of emergence and hierarchy, which leads to the need to develop new approaches to assess the autonomy of construction objects in CDT projects. The development of a methodology for assessing autonomy will transfer the design of CDT to a fundamentally new level, in which the transition from isolated objects to synergetic complexes with dynamic modeling of their life cycle will be carried out. Further research by the authors will be devoted to this issue.

**KEYWORDS:** CDT, integrated development of territories, life cycle management, construction object, sustainable development, engineering infrastructure, social infrastructure, residential development

**FOR CITATION:** Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Scenario-oriented design of construction projects in integrated territorial development projects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1278-1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291 (rus.).

*Corresponding author:* Liubov A. Adamtsevich, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Государственная программа комплексного развития территорий (КРТ) инициирована в 2020 г. и к настоящему моменту реализуется на всей территории Российской Федерации. При этом первоначально программа применялась преимущественно к бывшим промышленным зонам, однако после 2022 г. область действия программы изменилась, и сегодня проект может быть реализован практически на любой территории, включая следующие категории:

- территории с жилой застройкой, в том числе территории, занятые жилым фондом с высокой степенью физического износа, и зоны с морально устаревшей жилой застройкой;
- территории с нежилой застройкой, такие как промышленные зоны и комплексы, складские и логистические комплексы, торговые объекты и иные коммерческие площади, а также территории с объектами самовольного строительства;
- незастроенные территории на пустующих земельных участках или участки с объектами некапитального строительства или временными сооружениями и прочие.

К целям программы можно отнести несколько основных задач:

- реновация неэффективно используемых территорий, включая снос аварийного и ветхого жилья, а также невостребованных промышленных и иных объектов для строительства современного жилого фонда, коммерческой недвижимости и рекреационных зон;
- повышение привлекательности и функциональности городов за счет модернизации городской среды, обеспечения транспортной доступности, повышения туристического потенциала региона, реализации проектов комплексного развития территорий;
- создание комфортной городской среды и обеспечение устойчивого развития городов, формирование целостного образа района, включая транспортную инфраструктуру, объекты социального назначения и благоустроенные общественные пространства в близости от жилой застройки;

- стимулирование экономического роста путем привлечения частных инвестиций в строительный сектор, создание новых рабочих мест на всех этапах реализации проектов и др.

По данным Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, на конец 2024 г. программа КРТ затрагивает более 60 регионов России, в стадии внедрения или подготовки находилось более 900 проектов. Только в Москве в рамках реализации программы КРТ создано более 890 тыс. новых рабочих мест на общей территории более 4 тыс. га<sup>1</sup>. В Московской области ожидается выполнение аналогичных программ на территории 3,8 тыс. га.

Исполнение проектов КРТ имеет правовую основу, а механизм проведения закреплён в Градостроительном кодексе РФ (ГрК РФ).

В соответствии с Методическими рекомендациями по комплексному развитию территорий жилой застройки наряду со сведениями, подлежащими включению в решение о КРТ жилой застройки согласно ГрК РФ, рекомендуется на основании п. 7 ч. 1 ст. 67 ГрК РФ установить нормативным правовым актом высшего исполнительного органа государственной власти субъекта РФ требование о включении в решение о КРТ жилой застройки дополнительных сведений, предусмотренных основными параметрами архитектурно-градостроительной концепции (мастер-плана) комплексного развития территории жилой застройки, включая:

- основные технико-экономические параметры планируемой застройки;
- нормативные требования к минимальной обеспеченности территорий объектами коммунальной, транспортной и социальной инфраструктуры, а также к максимально допустимой удаленности этих объектов для населения;
- перечень, состав и технико-экономические параметры (назначение, мощность, пропускная способность, площадь, категория и др.) объектов комму-

<sup>1</sup> Московская программа комплексного развития территорий // Градостроительный комплекс Москвы. URL: <https://krt.mos.ru/>

нальной, социальной и транспортной инфраструктуры, подлежащих строительству, реконструкции;

- границы участков жилой застройки, подлежащих комплексному развитию, с указанием этапов реализации в соответствии с архитектурно-градостроительной концепцией (мастер-планом).

Указанные положения приводят к тому, что разработка проекта КРТ является длительным трудоемким процессом, который можно автоматизировать с использованием цифровых технологий.

Для определения возможностей цифровизации процессов в проектах КРТ проведен анализ публикационной активности в РИНЦ, который позволяет сделать вывод о том, что проектам КРТ в России присуща междисциплинарность, объединяющая экономические, правовые и цифровые инструменты [1–7]. Ключевым трендом в публикациях остается вопрос развития сельских территорий, где проекты КРТ направлены на инфраструктурное обновление объектов и решение демографических проблем [8–10], в то же время региональные практики содержат различные подходы от агротуристических «зеленых маршрутов» в проектах развития сельских территорий [11] до повышения цифровизации услуг. Однако публикаций, посвященных комплексному применению технологий Индустрии 4.0, методологии управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов строительства в проектах КРТ, мало [12].

При этом в исследовании [12] отмечено, что концепция управления жизненным циклом (УЖЦ) преимущественно ориентирована на отдельные объекты, в то время как КРТ фокусируется на городские и региональные системы. Применение концепции УЖЦ в проектах КРТ способно обеспечить синергетический эффект, например, оптимизировать проектирование и управление инфраструктурой за счет использования технологий информационного моделирования.

Значимыми аспектами взаимосвязи КРТ и УЖЦ также отмечены:

- интеграция долгосрочного территориального планирования с учетом динамики социально-экономических потребностей;
- преемственность этапов ЖЦ объектов строительства: проектирования, строительства и эксплуатации в контексте обеспечения устойчивого развития.

В зарубежных источниках также представлены публикации, касающиеся вопросов развития территорий, термин КРТ в них не используется, но активно описаны сценарии применения технологий четвертой промышленной революции. При этом ключевым фокусом во многих из них остаются сельскохозяйственные территории и вопросы развития территорий для повышения туристической привлекательности [13–21].

В труде [16] авторами рассматривается национальная система территориального пространственного планирования, где территория принимается как

сложная взаимосвязь между окружающей средой и ее функциями. Эта система состоит из статического и динамического взаимодействия между такими ключевыми элементами, как заинтересованные стороны, природная среда и деятельность в рамках определенной пространственно-временной структуры.

Исследование было направлено на создание комплексной интегрированной основы для интеллектуального территориального планирования, используя многослойные городские пространственно-временные данные, что позволило не только повысить эффективность управления территориями, но и обеспечить соблюдение принципов «экологического приоритета» и «человеко-ориентированного подхода».

Таким образом, анализ существующих исследований показывает, что в настоящее время отсутствует единый методический подход к проектированию объектов строительства в рамках реализации проектов КРТ, учитывающий современные технологические возможности. Целью данного исследования является разработка сценарно-ориентированного подхода к проектированию объектов строительства в проектах комплексного развития территорий и автоматизация его реализации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках представленного исследования сценарно-ориентированный подход к проектированию КРТ будет осуществлен через три основных направления, которые определены законодательно и авторами в работе [12]:

- комплексное развитие территории жилой застройки;
- комплексное развитие не жилой застройки;
- комплексное развитие незастроенной территории.

При реализации первого направления закладывается фокус на создание комфортной жилой среды, второе направление связано с повышением экономической эффективности коммерческих объектов, последнее — с обеспечением комплексного освоения территории «с нуля». На основании этого разработана блок-схема программы «Проект КРТ» (рис. 1), в которой учтены три сценария, и в зависимости от выбранного направления формируется отчет с необходимыми к возведению объектами.

На рис. 1 цифрами 1–3 обозначены сценарии комплексного развития территории, определенные в соответствии с нормативными документами. Действия по каждому сценарию представлены более подробно на рис. 2.

Критически важно осуществлять расчет параметров застройки в строгом соответствии с актуальной нормативной базой. Рассмотрим ключевые нормативно-правовые акты и своды правил, релевантные при применении сценарно-ориентированного подхода к проектам КРТ.



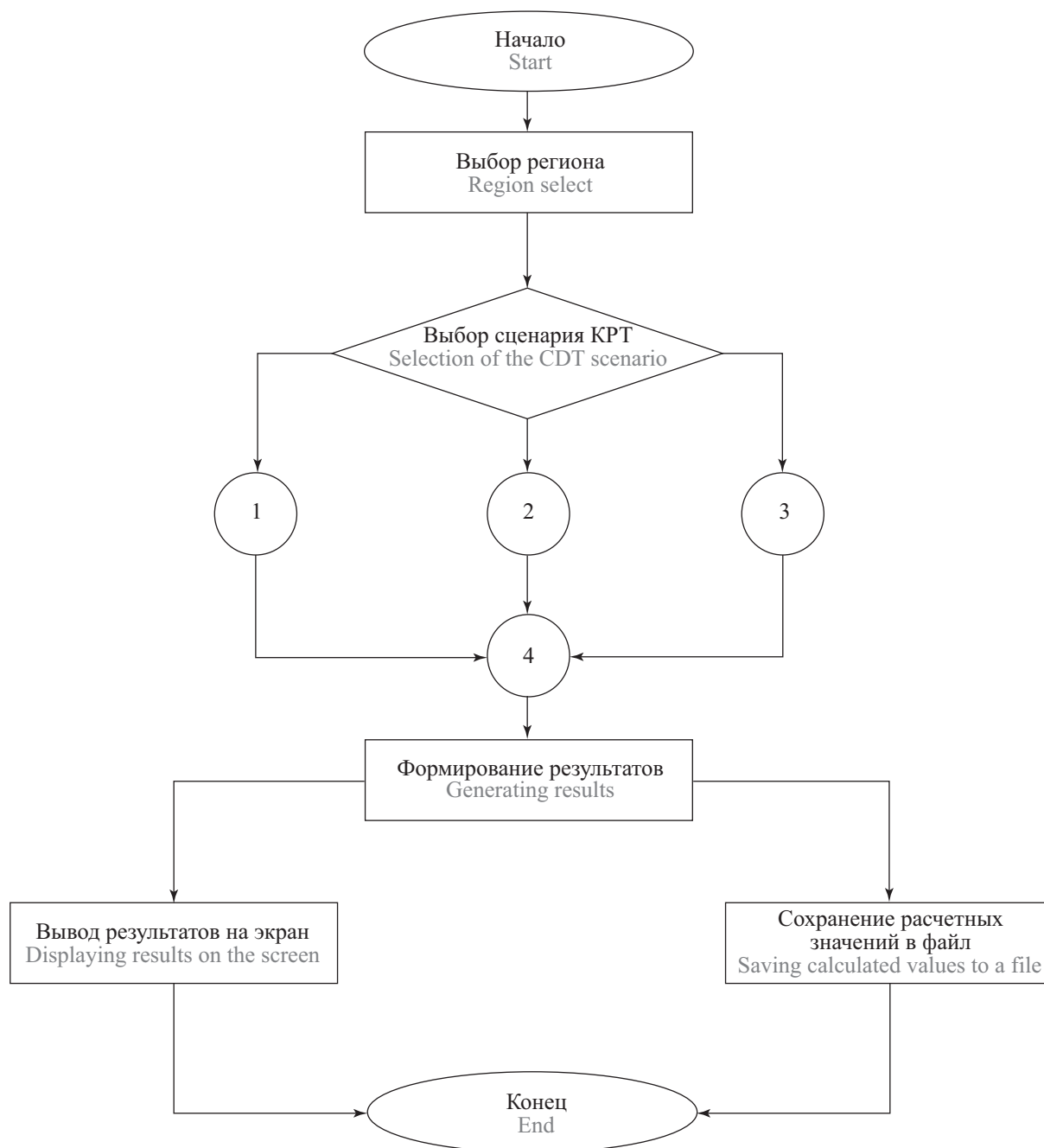


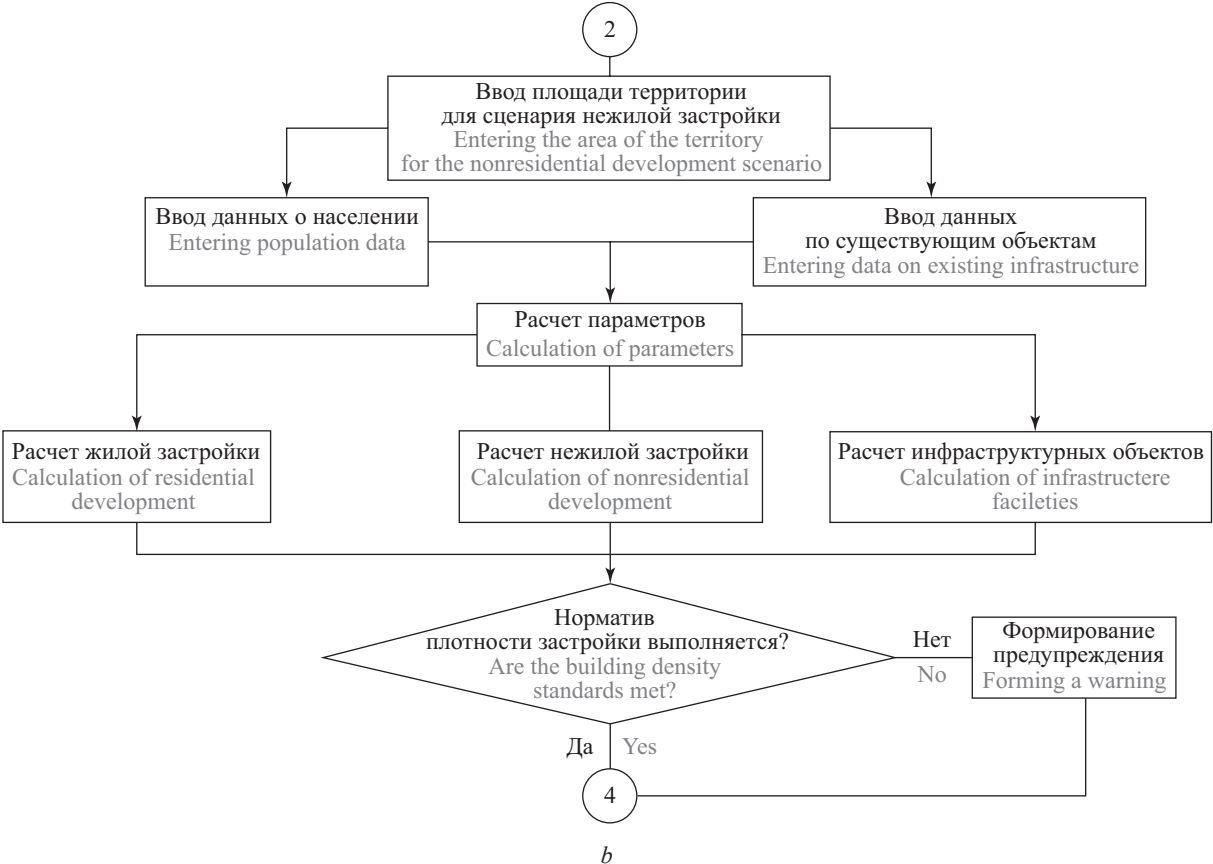
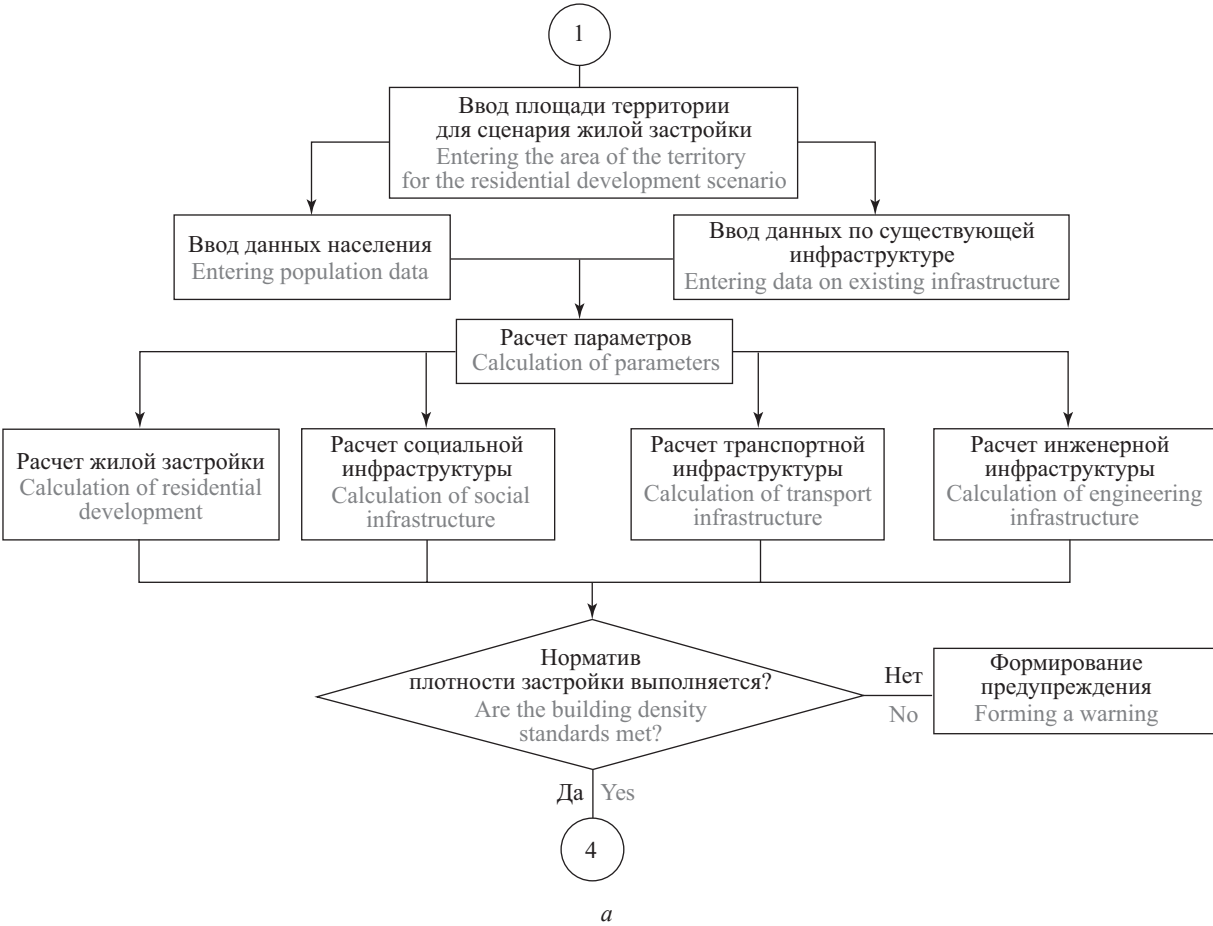
Рис. 1. Укрупненная блок-схема программы «Проект КРТ»

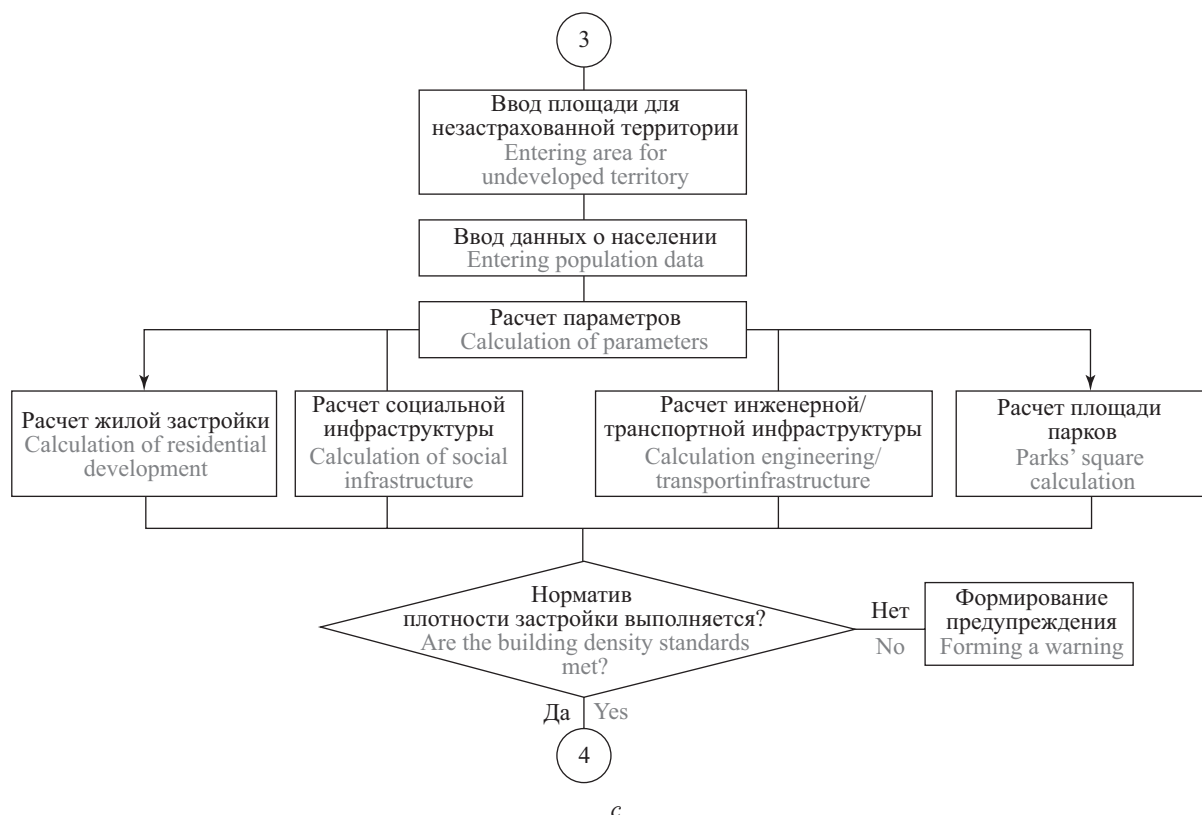
Fig. 1. Enlarged block diagram of the CDT project programme

В соответствии с Жилищным кодексом Российской Федерации от 29.12.2004 № 188-ФЗ (ред. от 24.06.2025) прописаны нормы площади на 1 человека, которые зависят от региона. Стандартный минимальный метраж составляет 18 м<sup>2</sup> на одного человека, но применяют его из расчета проживания в квартире трех человек и более. Для одного человека этот показатель составляет 33 м<sup>2</sup>, для двух жильцов — 42 м<sup>2</sup>. Таким образом, при реализации сценария «КРТ жилой застройки» в соответствии с СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные» на 1 человека закладывается 30 м<sup>2</sup>. Вместе с тем для унификации программы данные показатели и па-

раметры, описанные ниже, можно изменять, чтобы программный модуль был актуальным вне зависимости от изменения нормативов или стоимости строительства, которая меняется из года в год, и по данным ФАУ ФЦС составила 70 000 руб./м<sup>2</sup> на конец 2023 г.

Площадь типовой планировки квартиры. По данным аналитического обзора «Строительство жилья профессиональными застройщиками» на январь 2024 г. средняя площадь строящихся квартир в России составляла 49,1 м<sup>2</sup>. По информации аналитического отчета «Домклик» Сбербанк в настоящее время в зависимости от региона на рынке преобладают квартиры площадью от 30 до 50 м<sup>2</sup>, а медиан-





**Рис. 2.** Блок-схема для сценария комплексного развития территории жилой застройки (а); нежилой застройки (b); незастроенной территории (с)

**Fig. 2.** Block diagram for the scenario of complex development of a residential area (a); a non-residential development area (b); an undeveloped territory (c)

ная площадь по данным отчета составляет 48,6 м<sup>2</sup>. В этой связи будем ориентироваться на норматив 50 м<sup>2</sup>. Парковки рассчитываются с учетом одно машино-место на 80 м<sup>2</sup> общей площади квартир.

Для социальной инфраструктуры по СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» количество дошкольных образовательных организаций рассчитывается с учетом следующих нормативов: до 180 мест на 1000 человек, при этом, если речь идет о территории жилой застройки, то нормативом предусмотрено не более 100 мест на 1000 человек. Для общеобразовательных организаций в рассматриваемом СП по аналогии с дошкольными образовательными организациями в новостройках принимается не менее 180 мест на 1000 человек.

В соответствии с Приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации «О требованиях к размещению медицинских организаций государственной системы здравоохранения и муниципальной системы здравоохранения исходя из потребностей населения» в амбулаторных условиях, в условиях дневного стационара предполагается не менее 1 объекта на 2–10 тыс. чел. и 1 поликлиника на 20–50 тыс. человек, 1 детская поликлиника на 10–30 тыс. детей.

В населенных пунктах с численностью населения от 10 до 20 тыс. чел. по решению субъекта РФ возможно размещение нескольких врачебных амбулаторий или отделений общей врачебной практики, либо одной поликлиники.

Магазины торговой площади закладываются из учета 280 м<sup>2</sup> на 1000 чел., при этом для продовольственных товаров включено 100 м<sup>2</sup> на 1000 чел. и 180 м<sup>2</sup> на 1000 чел. для непродовольственных товаров.

В части транспортной инфраструктуры СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02–85\*» распространяется на проектирование вновь строящихся, реконструируемых и капитально ремонтируемых автомобильных дорог общего пользования в РФ по ГОСТ 33382 «Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация». Утвержденный процент, который необходимо выделить на транспортную инфраструктуру, в документе не указан.

Вместе с тем СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» указывает на нормы озеленения территории, которые варьируются от 40 до 50 % от общей площади, не менее 60 % территории микрорайонов в жилых зонах и не менее 15 % в промышленных зонах. Учитывая нормативы на жилую,

промышленную и социальную застройку, которые составляют порядка 30–40 %, на такую инфраструктуру, как дороги, тротуары, коммуникации и прочее, остается 10–25 %. Для расчета в программе возьмем среднее значение 15 % при сценарии развития жилой застройки, 20 % — для нежилой застройки. Однако точный процент определяется местными нормативами, типом застройки и транспортной нагрузкой, и при необходимости может быть изменен в программе. При реализации сценария по развитию территории, изначально ориентированной на нежилое использование, но требующей включения жилой функции, действующие регламенты устанавливают минимальную долю жилой застройки 30 % от общего объема.

СП 118.13330.2022. «Общественные здания и сооружения. СНиП 31-06–2009» (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 19.05.2022 № 389/пр) распространяется на проектирование общественных зданий и сооружений при новом строительстве, реконструкции и капитальном ремонте, и содержит требования к площади для рабочих мест для помещений различных назначений.

Требования к проектированию новых, реконструируемых и капитально ремонтируемых торгово-развлекательных комплексов содержатся в СП 464.1325800.2019 «Здания торгово-развлекательных комплексов. Правила проектирования». Возьмем усредненные значения, которые при необходимости могут быть скорректированы под требования заказчика: офисы до 20 м<sup>2</sup>/рабочее место в коммерческой недвижимости, до 45 м<sup>2</sup>/рабочее место в производственных зданиях, в торговых центрах до 30–40 м<sup>2</sup>/рабочее место.

При развитии незастроенной территории, в соответствии с рассмотренными нормативными документами, примем следующие средние значения: для жилья 40 м<sup>2</sup>/чел., больницы 5 коек/1000 чел., в структуре озелененных территорий общего пользования крупные парки и лесопарки шириной 0,5 км и более должны составлять не менее 10 % (СП 475.1325800.2020 «Парки. Правила градостроительного проектирования и благоустройства» не менее 1 парка на население от 10 до 100 тыс. чел.).

СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий СНиП 2.04.01–85\*» устанавливает требования к проектированию внутренних систем водоснабжения и водоотведения во вновь строящихся и реконструируемых производственных, общественных высотой не более 50 м и жилых зданиях высотой не более 75 м, включая многофункциональные здания и здания одного функционального назначения.

В соответствии с табл. А2 «Расчетные расходы воды потребителями» СП 30.13330.2020 предусмотрено среднесуточное расчетное значение расхода

воды в л в сутки — 180 л/с, из них 70 л/с — горячего водоснабжения.

По СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» в соответствии с табл. 7.1, удельная расчетная электрическая нагрузка электроприемников квартир жилых зданий, кВт/квартиру, среднее электроснабжение примем 10 кВт.

Для проверки плотности застройки используем нормативные показатели плотности застройки территориальных зон, представленные в СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование позволило сформировать сценарно-ориентированный подход к проектированию объектов строительства в проектах комплексного развития территорий и автоматизировать его путем разработки программного модуля «Проект КРТ».

Проект КРТ дает возможность рассчитывать параметры объектов и стоимость проектов по трем основным сценариям: жилая застройка, нежилая застройка и незастроенная территория. Предложенное решение учитывает региональные коэффициенты стоимости, выделяя Москву и Санкт-Петербург, а также другие регионы РФ, нормативы плотности застройки, нормативные требования к социальной инфраструктуре. При реализации сценариев развития жилой и нежилой застройки учитывается также существующая инфраструктура, которую можно использовать при реализации проектов КРТ. Полученное решение по рекомендуемым к реализации объектам сохраняется в детализированном отчете в формате \*.xlsx (Microsoft Excel). На рис. 3 представлена последовательность действий в программе «Проект КРТ».

При выборе региона программа предложит выбрать из списка (рис. 4).

При выборе сценария программа также выведет диалоговое окно с заложенными сценариями (рис. 5).

При этом для каждого сценария необходимо ввести площадь территории и данные по населению, но в зависимости от сценария вводятся различные сведения: информация о существующей инфраструктуре, включая детские сады (количество мест), школы (количество мест), поликлиники (количество), торговые площади (м<sup>2</sup> для продовольственных и непродовольственных магазинов); о коммерческих объектах.

Пример вывода данных для типового сценария жилой застройки с выводом предупреждения о плотности застройки показан на рис. 6.

В случае, если плотность застройки выходит за нормативные пределы, программа выведет пред-



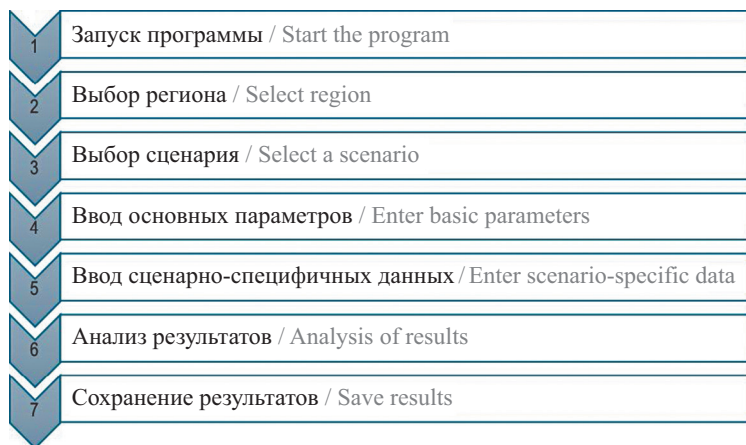


Рис. 3. Последовательность действий при работе в программе «Проект КРТ»

Fig. 3. Sequence of actions during working in the “Project KRT” programme

Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития территорий  
\*\*\*\*\*

Выберите регион:

1. Москва
2. Санкт-Петербург
3. Другие регионы

Ваш выбор (1-3):

Scenario-Oriented Design for Comprehensive Territory Development Projects  
\*\*\*\*\*

Select region:

1. Moscow
2. Saint Petersburg
3. Other regions

Your choice (1-3):

Рис. 4. Окно выбора региона в программном модуле «Проект КРТ»

Fig. 4. Region selection window in the “CDT Project” software module

Выберите сценарий:

1. Комплексное развитие территории жилой застройки
2. Комплексное развитие территории не жилой застройки
3. Комплексное развитие незастроенной территории

Ваш выбор (1-3):

Select scenario:

1. Residential Development
2. Non-Residential Development
3. Greenfield Development

Your choice (1-3):

Рис. 5. Окно выбора сценария в программном модуле «Проект КРТ»

Fig. 5. Scenario selection window in the “CDT Project” software module

упреждение. Кроме того, программный модуль автоматически проверяет корректность вводимых данных и при ошибке запросит ввести информацию повторно.

По итогам расчетов формируются ключевые показатели для реализации выбранного сценария развития: потребность в объектах социальной инфраструктуры, сметная стоимость жилищного строительства, затраты на создание объектов дорожно-

транспортной сети, а также определяется сводная стоимость проекта с применением регионального корректирующего коэффициента (рис. 7).

Если плотность застройки не выходит за нормативные пределы, программа предупреждение выводить не будет. Пример вывода данных для типового сценария жилой застройки без вывода предупреждения о плотности застройки представлен на рис. 8.

Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития территорий  
\*\*\*\*\*

Выберите регион:

- 1. Москва
- 2. Санкт-Петербург
- 3. Другие регионы

Ваш выбор (1-3): 1

Выберите сценарий:

- 1. Комплексное развитие территории жилой застройки
- 2. Комплексное развитие территории не жилой застройки
- 3. Комплексное развитие незастроенной территории

Ваш выбор (1-3): 1

Введите площадь территории (га): 10

Введите численность населения: 5000

Учет существующей инфраструктуры (введите 0, если объектов нет):

Количество мест в детских садах: 0

Количество мест в школах: 0

Количество поликлиник: 0

Площадь продовольственных магазинов (м²): 0

Площадь непродовольственных магазинов (м²): 0

⚠ Внимание: плотность жилой застройки (1.65 тыс.м²/га) превышает максимально допустимую (1.2 тыс.м²/га)

=====

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

=====

Сценарий: Комплексное развитие территории жилой застройки

Регион: Москва

Площадь территории: 10.0 га

Плотность застройки: 1.65 тыс.м²/га

Население: 5 000 чел

Общая стоимость: 24.38 млрд руб

Результаты сохранены в файл: results\KPT\_Москва\_RESIDENTIAL.xlsx

Scenario-Oriented Design for Comprehensive Territory Development Projects

\*\*\*\*\*

Select region:

- 1. Moscow
- 2. Saint Petersburg
- 3. Other regions

Your choice (1-3): 1

Select scenario:

- 1. Residential Development
- 2. Non-Residential Development
- 3. Greenfield Development

Your choice (1-3): 1

Enter territory area (ha): 10

Enter population: 5000

Existing infrastructure (enter 0 if no facilities):

Kindergarten places: 0

School places: 0

Number of clinics: 0

Food retail area (m²): 0

Non-food retail area (m²): 0

⚠ Warning: Residential development density (1.65 th.m²/ha) exceeds maximum (1.2 th.m²/ha)

=====

FINAL RESULTS

=====

Scenario: Residential Development

Region: Moscow

Territory area: 10.0 ha

Development density: 1.65 th.m²/ha

Population: 5 000 persons

Total cost: 24.38 bln RUB

Results saved to: results\CDT\_Moscow\_RESIDENTIAL.xlsx

Рис. 6. Пример вывода расчетных данных на экране программы с предупреждением о плотности застройки

Fig. 6. Example of calculated output data on the programme screen with a warning about the building density with a warning about the building density

Параметр	Значение
Тип объекта	Комплексное развитие территории жилой застройки
Регион	Москва
Площадь территории (га)	10
Население (чел)	5 000
Существующая инфраструктура_Детские сады (мест)	0
Существующая инфраструктура_Школы (мест)	0
Существующая инфраструктура_Поликлиники (шт)	0
Существующая инфраструктура_Прод. магазины (м²)	0
Существующая инфраструктура_Непрод. магазины (м²)	0
Жилье_Площадь (м²)	165 000
Жилье_Стоимость (руб.)	19 635 000 000
Социальная инфраструктура_Детские сады_Существующие места (мест)	0
Социальная инфраструктура_Детские сады_Требуемые места (мест)	900
Социальная инфраструктура_Детские сады_Новые места (мест)	900
Социальная инфраструктура_Детские сады_Стоимость	183 600 000
Социальная инфраструктура_Школы_Существующие места (мест)	0
Социальная инфраструктура_Школы_Требуемые места (мест)	900
Социальная инфраструктура_Школы_Новые места (мест)	900
Социальная инфраструктура_Школы_Стоимость (руб.)	306 000 000
Социальная инфраструктура_Поликлиники_Существующие объекты (шт)	0
Социальная инфраструктура_Поликлиники_Требуемые объекты (шт)	1
Социальная инфраструктура_Поликлиники_Новые объекты (шт)	1
Социальная инфраструктура_Поликлиники_Стоимость (руб.)	85 000 000
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Существующая прод. площадь (м²)	0
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Требуемая прод. площадь (м²)	500
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Новая прод. площадь (м²)	500
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Существующая непрод. площадь (м²)	0
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Требуемая непрод. площадь (м²)	900
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Новая непрод. площадь (м²)	900
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Общая новая площадь (м²)	1 400
Социальная инфраструктура_Торговые объекты_Стоимость (руб.)	190 400 000
Транспортная инфраструктура_Дороги_Площадь дорог (га)	2
Транспортная инфраструктура_Дороги_Стоимость (руб.)	38 250 000
Транспортная инфраструктура_Парковки_Парковочные места (мест)	2 062
Транспортная инфраструктура_Парковки_Стоимость (руб.)	1 051 875 000
Коммунальные сети_Водоснабжение_Объем воды (тыс.м³)	1
Коммунальные сети_Водоснабжение_Стоимость (руб.)	1 530 000
Коммунальные сети_Электроснабжение_Мощность (кВт)	33 951
Коммунальные сети_Электроснабжение_Стоимость (руб.)	2 885 802 469
Общая стоимость проекта (руб.)	24 377 457 469

Parameter	Value
Project Type	Residential Development
Region	Moscow
Land Area (ha)	10
Population (persons)	5 000
Existing Infrastructure_Kindergarten Places	0
Existing Infrastructure_School Places	0
Existing Infrastructure_Clinics	0
Existing Infrastructure_Food Retail Area (m²)	0
Existing Infrastructure_Non-Food Retail Area (m²)	0
Development Density (th.m²/ha)	2
Housing_Housing Area (m²)	165 000
Housing_Cost	19 635 000 000
Social Infrastructure_Kindergartens_Existing Places	0
Social Infrastructure_Kindergartens_Required Places	900
Social Infrastructure_Kindergartens_New Places	900
Social Infrastructure_Kindergartens_Cost	183 600 000
Social Infrastructure_Schools_Existing Places	0
Social Infrastructure_Schools_Required Places	900
Social Infrastructure_Schools_New Places	900
Social Infrastructure_Schools_Cost	306 000 000
Social Infrastructure_Clinics_Existing Facilities	0
Social Infrastructure_Clinics_Required Facilities	1
Social Infrastructure_Clinics_New Facilities	1
Social Infrastructure_Clinics_Cost	85 000 000
Social Infrastructure_Retail Facilities_Existing Food Retail Area (m²)	0
Social Infrastructure_Retail Facilities_Required Food Retail Area (m²)	500
Social Infrastructure_Retail Facilities_New Food Retail Area (m²)	500
Social Infrastructure_Retail Facilities_Existing Non-Food Retail Area	0
Social Infrastructure_Retail Facilities_Required Non-Food Retail Area	900
Social Infrastructure_Retail Facilities_New Non-Food Retail Area (m²)	900
Social Infrastructure_Retail Facilities_Total New Area (m²)	1 400
Social Infrastructure_Retail Facilities_Cost	190 400 000
Transport Infrastructure_Roads_Road Area (ha)	2
Transport Infrastructure_Roads_Cost	38 250 000
Transport Infrastructure_Parking_Parking Spaces	2 062
Transport Infrastructure_Parking_Cost	1 051 875 000
Utility Networks_Water Supply_Water Volume (th.m³)	1
Utility Networks_Water Supply_Cost	1 530 000
Utility Networks_Power Supply_Capacity (kW)	33 951
Utility Networks_Power Supply_Cost	2 885 802 469
Total Project Cost	24 377 457 469

Рис. 7. Пример типового отчета для выбранного сценария

Fig. 7. Example of a typical report for the selected scenario



Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития территорий  
\*\*\*\*\*

Выберите регион:

- 1. Москва
  - 2. Санкт-Петербург
  - 3. Другие регионы
- Ваш выбор (1-3): 1

Выберите сценарий:

- 1. Комплексное развитие территории жилой застройки
  - 2. Комплексное развитие территории нежилрой застройки
  - 3. Комплексное развитие незастроенной территории
- Ваш выбор (1-3): 1

Введите площадь территории (га): 9  
Введите численность населения: 2000

Учет существующей инфраструктуры (введите 0, если объектов нет):

- Количество мест в детских садах: 120
- Количество мест в школах: 200
- Количество поликлиник: 1
- Площадь продовольственных магазинов (м²): 0
- Площадь непродовольственных магазинов (м²): 0

=====

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

=====

Сценарий: Комплексное развитие территории жилой застройки  
Регион: Москва  
Площадь территории: 9.0 га  
Плотность застройки: 0.73 тыс.м²/га  
Население: 2 000 чел  
Общая стоимость: 9.64 млрд руб

Результаты сохранены в файл: results\KPT\_Москва\_RESIDENTIAL.xlsx

Scenario-Oriented Design for Comprehensive Territory Development Projects

\*\*\*\*\*

Select region:

- 1. Moscow
  - 2. Saint Petersburg
  - 3. Other regions
- Your choice (1-3): 1

Select scenario:

- 1. Residential Development
  - 2. Non-Residential Development
  - 3. Greenfield Development
- Your choice (1-3): 1

Enter territory area (ha): 9  
Enter population: 2000

Existing infrastructure (enter 0 if no facilities):

- Kindergarten places: 120
- School places: 200
- Number of clinics: 1
- Food retail area (m²): 0
- Non-food retail area (m²): 0

=====

FINAL RESULTS

=====

Scenario: Residential Development  
Region: Moscow  
Territory area: 9.0 ha  
Development density: 0.73 th.m²/ha  
Population: 2 000 persons  
Total cost: 9.64 bln RUB

Results saved to: results\CDT\_Moscow\_RESIDENTIAL.xlsx

Рис. 8. Пример вывода расчетных данных на экране программы в случае, когда все нормативы соблюдаются

Fig. 8. Example of the output of calculated data on the programme screen in the case where all standards are met



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение представленного подхода позволит сократить сроки разработки проектов КРТ с учетом особенностей застраиваемой территории, а предлагаемый программный модуль может быть адаптирован под актуальные нормативные требования. Вместе с тем программный модуль дает предложение по объектам строительства, но не оценивает эффективность их совместной работы.

Кроме того, в настоящее время традиционный подход рассматривает объекты КРТ как изолиро-

ванные элементы, что нарушает системотехнические принципы эмерджентности и иерархичности, что приводит к необходимости разработки новых подходов для оценки автономности объектов строительства в проектах КРТ.

Разработка методологии оценки автономности переведет проектирование КРТ на принципиально новый уровень, в котором будет осуществлен переход от изолированных объектов к синергетическим комплексам с динамическим моделированием их ЖЦ. Данному вопросу будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Еремина И.А., Полянин А.В. Цифровизация комплексных региональных проектов развития территорий // Естественно-гуманитарные исследования. 2021. № 33 (1). С. 90–95. DOI: 10.24412/2309-4788-2021-10838. EDN YIUMSD.
2. Беляков С.И. Механизмы формирования и развития инвестиционного портфеля организаций, осуществляющих комплексное развитие территорий // Недвижимость: экономика, управление. 2023. № S3. С. 164–167. EDN BKEDCL.
3. Михалёва Н.В. Комплексное развитие территории как инструмент реализации социально-экономического развития муниципалитета (на примере города Таганрога) // Современные тренды и приоритеты устойчивого развития регионов : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 300-летию Российской академии наук. 2023. С. 145–151. EDN NQIDCN.
4. Маликов В.В. Нововведения в правовом регулировании комплексного развития территории // Аграрное и земельное право. 2021. № 9 (201). С. 40–43. DOI: 10.47643/1815-1329\_2021\_9\_40. EDN VWJWEE.
5. Сергунина Н.А. Правовая природа договора о комплексном развитии территории // Вестник Российской правовой академии. 2019. № 1. С. 85–91. EDN VIYZEB.
6. Друева А.А. Комплексное развитие территории: правовые условия обеспечения // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). 2022. № 12 (100). С. 82–90. DOI: 10.17803/2311-5998.2022.100.12.082-090. EDN LSMGJP.
7. Кирсанов А.Р. Договор о комплексном развитии территории: правовая природа и существенные условия // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2024. № 7 (274). С. 8–18. EDN RGPVKV.
8. Брянская О.Л. Реализация государственной программы «Комплексное развитие сельских территорий Республики Бурятия» // Экономика и предпринимательство. 2023. № 7 (156). С. 480–484. DOI: 10.34925/EIP.2023.156.7.080. EDN ABJZCS.
9. Шибаева Н.А., Катальников М.А. Комплексное развитие сельских территорий как основа устойчивого развития регионов России // Друкеровский вестник. 2023. № 2 (52). С. 185–192. DOI: 10.17213/2312-6469-2023-2-185-192. EDN GGLEBE.
10. Леонов П.В., Колотырин К.П. Развитие социальной инфраструктуры сельских территорий на основе экономических инструментов программы комплексного развития сельских территорий // Reports Scientific Society. 2024. № 6 (50). С. 44–47. EDN UIUNFQ.
11. Патрина Е.Н., Медведева Л.Н. Основные направления развития «зеленых маршрутов» в системе комплексного развития сельских территорий Волгоградской области // Стратегические ориентиры инновационного развития АПК в современных экономических условиях : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 264–271. EDN WYRXDP.
12. Адамцевич Л.А. Управление жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов в проектах комплексного развития территорий // Вестник МГСУ. 2025. № 20 (6). С. 957–966. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966
13. Alla L., Alj B., Bentalha B. Utilizing Technology to Manage Territories // Advances in Electronic Government, Digital Divide, and Regional Development. 2024. DOI: 10.4018/979-8-3693-6854-1
14. Steward R., Chopin P., Verburg P.H. Impact-driven spatial planning for future-proofing small island states: A scenario-based land model analysis in Curaçao // Applied Geography. 2025. Vol. 178. P. 103604. DOI: 10.1016/j.apgeog.2025.103604
15. Feng D., Long H., Wang K., Jiang Y., Huang Y. Review and prospect of research on spatial layout optimization of rural settlements in China // Geographical Research. 2024. Vol. 43. Pp. 2215–2232.
16. Deng M., Deng C. Data-Assisted Smart Territorial Spatial Planning Practice: A Case Study of Guangzhou // Tropical Geography. 2023. Vol. 43. Pp. 2311–2320.
17. Suárez Roldan C., Méndez Giraldo G.A., López Santana E. Sustainable Development in Rural Terri-

tories within the Last Decade: A Review of the State of the Art // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 7. P. e17555. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17555

18. Chen K., Long H. The progress and prospects of land system optimization promoting rural development transformation // *Geographical Research*. 2022. Vol. 41. Issue 11. Pp. 2932–2945.

19. Reyes C.A.R., Muñoz-Quintero S.I., Acevedo-Charry O. Geotourism as a strategy of sustainable rural development of the Paipa — Iza volcanic complex in the eastern Andes of Colombia: An innovative approach // *Turismo y Sociedad*. 2022. Vol. 31. Pp. 281–301. DOI: 10.18601/01207555.n31.13

20. Fattore C., Ermini R. Hydro-Morphological Analysis for Sustainable Planning: The Case Study of Matera, Italy // *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2025. Pp. 237–242. DOI: 10.1007/978-3-031-76096-9\_20

21. Chaudhry I.S. Viable system model: a tool for managing sustainable development holistically // *Management & Sustainability: An Arab Review*. 2022. Vol. 1. Issue 1. Pp. 50–65. DOI: 10.1108/MSAR-01-2022-0008

Поступила в редакцию 21 мая 2025 г.  
Принята в доработанном виде 31 июля 2025 г.  
Одобрена для публикации 31 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Азарий Абрамович Лапидус** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

**Любовь Андреевна Адамцевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Eremina I.A., Polyanin A.V. Digitalization of complex regional development projects of territories. *Natural-Humanitarian Studies*. 2021; 33(1):90-95. DOI: 10.24412/2309-4788-2021-10838. EDN YIUMSD. (rus.).

2. Beliaikov S.I. Mechanisms for the formation and development of the investment portfolio of organizations realizing in the integrated development of territories. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; S3:164-167. EDN BKEDCL. (rus.).

3. Mikhaleva N.V. Comprehensive development of the territory as a tool for implementing socio-economic development of a municipality (based on the example of the city of Taganrog). *Modern trends and priorities for sustainable development of regions : proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*. 2023; 145-151. EDN NQIDCN. (rus.).

4. Malikov V.V. Innovations in the legal regulation of the complex development of the territory. *Agrarian and Land Law*. 2021; 9(201):40-43. DOI: 10.47643/1815-1329\_2021\_9\_40. EDN VWJWEE. (rus.).

5. Sergunina N.A. Legal nature of the agreement on the integrated development of territory. *Her-*

*ald of the Russian Law Academy*. 2019; 1:85-91. EDN VIYZEB. (rus.).

6. Druueva A.A. Integrated development of the territory: legal conditions for ensuring. *Courier of the Kutafin Moscow State Law University (MSAL)*. 2022; 12(100): 82-90. DOI: 10.17803/2311-5998.2022.100.12.082-090. EDN LSMGJP. (rus.).

7. Kirsanov A.R. Agreement on the integrated development of the territory: legal nature and essential conditions. *Property relations in the Russian Federation*. 2024; 7(274):8-18. EDN RGPVKV. (rus.).

8. Bryanskaya O.L. Implementation of the state program “comprehensive development of rural areas of the republic of Buryatia”. *Economy and Entrepreneurship*. 2023; 7(156):480-484. DOI: 10.34925/EIP.2023.156.7.080. EDN ABJZCS. (rus.).

9. Shibaeva N.An., Katalnikova M.Al. Integrated development of rural territories as a basis for sustainable development of Russian regions. *Drukerovskij vestnik*. 2023; 2(52):185-192. DOI: 10.17213/2312-6469-2023-2-185-192. EDN GGLEBE. (rus.).

10. Leonov P.V., Kolotyryn K.P. Development of social infrastructure of rural areas using economic instruments of the integrated rural development program. *Reports Scientific Society*. 2024; 6(50):44-47. EDN UIUNFQ. (rus.).

11. Patrina E.N., Medvedeva L.N. Main directions of development of “green routes” in the system of integrated development of rural areas of the Volgograd region. *Strategic guidelines for innovative development of the agro-industrial complex in modern economic conditions : materials of the international scientific and practical conference*. 2016; 264-271. EDN WYRXDP. (rus.).
12. Adamtsevich L.A. Life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities in projects of integrated development of territories. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):957-966. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966 (rus.).
13. Alla L., Alj B., Bentalha B. Utilizing Technology to Manage Territories. *Advances in Electronic Government, Digital Divide, and Regional Development*. 2024. DOI: 10.4018/979-8-3693-6854-1
14. Steward R., Chopin P., Verburg P.H. Impact-driven spatial planning for future-proofing small island states: A scenario-based land model analysis in Curaçao. *Applied Geography*. 2025; 178:103604. DOI: 10.1016/j.apgeog.2025.103604
15. Feng D., Long H., Wang K., Jiang Y., Huang Y. Review and prospect of research on spatial layout optimization of rural settlements in China. *Geographical Research*. 2024; 43:2215-2232. DOI: 10.11821/dljy020240064
16. Deng M., Deng C. Data-Assisted Smart Territorial Spatial Planning Practice: A Case Study of Guangzhou. *Tropical Geography*. 2023; 43:2311-2320. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003781
17. Suárez Roldan C., Méndez Giraldo G.A., López Santana E. Sustainable Development in Rural Territories within the Last Decade: A Review of the State of the Art. *Heliyon*. 2023; 9(7):e17555. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17555
18. Chen K., Long H. The progress and prospects of land system optimization promoting rural development transformation. *Geographical research*. 2022; 41:2932-2945. DOI: 10.11821/dljy020210951
19. Reyes C.A.R., Muñoz-Quintero S.I., Acevedo-Charry O. Geotourism as a strategy of sustainable rural development of the Paipa — Iza volcanic complex in the eastern Andes of Colombia: An innovative approach. *Turismo y Sociedad*. 2022; 31:281-301. DOI: 10.18601/01207555.n31.13
20. Fattore C., Ermini R. Hydro-Morphological Analysis for Sustainable Planning: The Case Study of Matera, Italy. *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2025; 237-242. DOI: 10.1007/978-3-031-76096-9\_20
21. Chaudhry I.S. Viable system model: a tool for managing sustainable development holistically. *Management & Sustainability: An Arab Review*. 2022; 1(1):50-65. DOI: 10.1108/MSAR-01-2022-0008

Received May 21, 2025.

Adopted in revised form on July 31, 2025.

Approved for publication on July 31, 2025.

**B I O N O T E S :** **Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

**Liubov A. Adamtsevich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.*

*The authors declare no conflicting interests.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

*\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.



Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

**Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  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 аннотаций.**

**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 желательно 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 тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

### REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Оформляются на русском и английском языках.**

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**Bionotes:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.**

*Вклад авторов:*

*Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).*

**Пример:**

*Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.*

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

**Пример:**

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов*



И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в 

ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 

0000000000000000000130

ОКТМО 

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2025 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(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 \_\_\_\_\_

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в 

ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 

0000000000000000000130

ОКТМО 

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2025 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(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 \_\_\_\_\_

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/>



И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

771610339103214643000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК00000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес \_\_\_\_\_

плательщика \_\_\_\_\_

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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

771610339103214643000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК00000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,  
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес \_\_\_\_\_

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма \_\_\_\_\_

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись \_\_\_\_\_

плательщика \_\_\_\_\_

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

**ВНИМАНИЕ!**

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

