DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 20. Выпуск 11
2025

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

Сквозной номер 204

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 20. Issue 11
2025

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

«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: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
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:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
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	26.11.2025.
Подписан в свет	28.11.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 23,02. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 383

Знаком информационной продукции не маркируется.

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2025

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-Мартиросян, д-р техн. наук, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», 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 Емиоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

Армен Юрьевич Казарян, д-р искусствоведения, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, 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*

Юлия Зиновьевна Алейникова

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

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Наталия 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 MGSU
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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	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.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	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: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	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.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru, journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.11.2025

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

Deputys Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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*

Yulia Z. Aleynikova

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Elena Yu. Kulikova, National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

Oleg G. Primin, "MosVodoKanalNIIProekt" JSC, Moscow, Russian Federation

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

Vladimir I. Travush, CJSC "Gorproject", Moscow, Russian Federation

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Н.В. Данилина, Л.Н. Солнцева
Принципы формирования компактных малых городов России с целью обеспечения их градостроительной безопасности **1641**

А. Аасем, В.Н. Ткачев
Две концепции обновления сирийской архитектуры **1654**

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

Г.М. Бажин
Соединение профилированного настила с прогонами покрытия на высокопрочных болтах **1666**

С.В. Кузнецов, С.А. Калиновский
Обобщенные гиперупругие потенциалы для одномерных задач из бимодульных материалов **1679**

А.Г. Алексеев, С.Г. Безволев
Инженерный метод определения осадки сваи с учетом допускаемой упругопластической работы грунта **1691**

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.Н. Азаров, О.В. Бурлаченко, Е.В. Сысоева, А.О. Бурлаченко
Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях. **1707**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.С. Липатов, Е.С. Гогина
Перспективы модификации метода получения струвита из высококонцентрированных сточных вод . . . **1718**

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.И. Андреев, А.Е. Семенов
Применение аккумуляторов холода непосредственного контакта сред в системах кондиционирования воздуха. **1728**

Е.О. Шеремет, В.А. Уваров, Н.Ю. Никулин, А.А. Шеремет, Н.Ю. Саввин
Экспериментальные исследования обоснованности температуры наиболее холодной пятидневки на территории Белгородской области **1744**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.В. Розанцева
Разработка быстроразвертываемой технологии бескранового монтажа временных пролетных строений **1767**

И.И. Акулова, Г.С. Славчева, С.В. Беляева
Производственно-технический потенциал как основа конкурентоспособности предприятия промышленности строительных материалов **1782**

Т.Н. Кисель, Ю.С. Прохорова, Ц. Чжиминь
Особенности цифровизации предприятий различных видов деятельности **1794**

Н.Г. Верстина, О.О. Донская
Структурирование продуктового портфеля кампуса в условиях достижения конкурентоспособности . . . **1806**

Требования к оформлению научной статьи **1817**

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Nina V. Danilina, Liia N. Solnceva
Principles for the formation of compact small towns in Russia with the aim of ensuring their urban safety **1641**

Ammar Aasem, Valentin N. Tkachev
Two Concepts of Renewal of Syrian Architecture **1654**

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

Grigoriy M. Bazhin
Connection of profiled decking with roof purlins using high-strength bolts **1666**

Sergey V. Kuznecov, Sergey A. Kalinovsky
Smooth hyperelastic potentials for 1d problems of bimodular materials **1679**

Andrej G. Alekseev, Stepan G. Bezvolev
Engineering method for determining pile settlement taking into account the permissible elastic-plastic behaviour of the soil **1691**

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Valerij N. Azarov, Oleg V. Burlachenko, Elena V. Sy'soeva, Alexander O. Burlachenko
A model for selecting effective solutions to enhance occupational safety and environmental safety of construction in urban areas **1707**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Vitaly S. Lipatov, Elena S. Gogina
Prospects for modifying the method of obtaining struvite from highly concentrated wastewater **1718**

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Aleksander I. Andreev, Alexander E. Semenov
Application of direct contact cold accumulators in air conditioning systems **1728**

Evgeniy O. Sheremet, Valeriy A. Uvarov, Nikolaj Yu. Nikulin, Alena A. Sheremet, Nikita Yu. Savvin
Experimental studies on the validity of the coldest five-day period temperature in the Belgorod Region **1744**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Nadezhda V. Rozantseva
Development and optimization of technology for crane-free installation of bridge superstructures **1767**

Inna I. Akulova, Galina S. Slavcheva, Svetlana V. Belyaeva
Production and technical potential as the basis of building materials company competitiveness **1782**

Tatiana N. Kisel, Yulia S. Prokhorova, Ju Zhimin
Digitalization of investment and construction enterprises focused on various activities **1794**

Natalia G. Verstina, Olga O. Donskaya
Structuring the campus product portfolio for competitive performance **1806**

Requirements for research paper design **1817**

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

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 applies 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).

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 711.4
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1641-1653

Принципы формирования компактных малых городов России с целью обеспечения их градостроительной безопасности

Нина Васильевна Данилина[1,2], Лия Нодаровна Солнцева[1]

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

[2] Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена стратегическими целями градостроительной безопасности малых городов России. Градостроительная безопасность обеспечивается политикой управляемого сжатия для формирования компактной городской формы. Компактность достигается за счет уплотнения застройки, повышения инфраструктурной насыщенности и 15-минутной доступности основных социальных объектов. Научной проблемой является недостаточная изученность градостроительных аспектов образования компактных городов. Цель исследования — выявление принципов формирования компактных городов при реализации политики управляемого сжатия для обеспечения градостроительной безопасности. Задачи: анализ существующего опыта, определение аспектов устойчивого развития компактных городов при реализации политики их управляемого сжатия, разработка концептуальной и теоретической модели, оценка компактности территориально-пространственной среды на примерах трех городов, разработка принципов создания компактных городов.

Материалы и методы. Применены системный анализ при разработке объекта, концептуальной и теоретической модели и порядка исследования. Для сбора и обработки данных — метод пространственного и геоинформационного моделирования.

Результаты. Исследование проведено для трех малых городов России — Истры, Гусева и Невьянска. Выполнены анализ застройки, оценка параметров 15-минутной доступности для различных видов транспорта методом построения изохрон, проверка пространственной связности. Сформулированы принципы формирования компактной территориально-планировочной структуры с целью обеспечения градостроительной безопасности.

Выводы. Обеспечение градостроительной безопасности малых городов России представляет собой народно-хозяйственную задачу градостроительной деятельности. Образование компактных городов при реализации политики управляемого сжатия позволит внести вклад в решение задач повышения индекса качества городской среды. В исследовании предложены и обоснованы четыре принципа обеспечения компактности через пространственную связность, обеспечение доступности городских территорий, приоритизацию улично-дорожной сети по типу мобильности и контекстное проектирование участков улично-дорожной сети. Реализация предложенных принципов позволит внести вклад в научно-методическую базу градостроительного развития малых городов и обеспечить достижение цели их устойчивого развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малый город, компактный город, политика управляемого сжатия, территориально-планировочная структура города, 15-минутный город, территориальная связность, доступность, улично-дорожная сеть, устойчивое развитие, градостроительное развитие, пространственный геоинформационный анализ

Благодарности. Статья выполнена в рамках ФНИ на 2025 г. по теме № 2.1.1.3 «Научно-методические основы формирования стратегии градостроительной безопасности РФ как составной части реализации Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Руководитель работы в рамках Плана ФНИ на 2025 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Данилина Н.В., Солнцева Л.Н.* Принципы формирования компактных малых городов России с целью обеспечения их градостроительной безопасности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1641–1653. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1641-1653

Автор, ответственный за переписку: Лия Нодаровна Солнцева, lika-nt@yandex.ru.

Principles for the formation of compact small towns in Russia with the aim of ensuring their urban safety

Nina V. Danilina[1,2], Liia N. Solnceva[1]

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

[2] Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

© Н.В. Данилина, Л.Н. Солнцева, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is driven by the strategic objective of ensuring the urban planning safety of small towns in Russia. The pursuit of urban planning safety is achieved through the implementation of a policy of managed shrinkage, which is intended to shape a compact urban form. The objective of compactness is achieved by densifying the built-up area, increasing infrastructure provision, and attaining 15-minute accessibility to key social facilities. The scientific problem that is the focus of this study is the limited exploration of the urban-planning aspects of compact-city formation. The objective of this study is to establish principles for the development of compact cities under a managed-shrinkage policy, with a view to ensuring the safety of urban planning. The objectives are: to analyze existing practice; to define sustainability aspects of compact cities under managed shrinkage; to develop a conceptual and theoretical model; to assess spatial compactness in three case cities; and to formulate principles for compact-city formation.

Materials and methods. The development of the research object, conceptual and theoretical model, and study design was underpinned by a systems approach. The collection and processing of data was facilitated by the utilization of spatial and geoinformation modelling techniques.

Results. The study encompassed three small Russian towns — Istra, Gusev, and Nevyansk. The urban fabric was analyzed, and 15-minute accessibility for multiple transport modes was evaluated using isochrone-based analysis. Spatial connectivity was also verified. The findings of the study resulted in the formulation of principles for the establishment of a compact territorial–spatial structure, with the objective of ensuring the safety of urban planning.

Conclusions. The assurance of urban planning safety in Russia's small towns represents a nationwide undertaking in urban development. The implementation of compact-city formation under a managed-shrinkage policy has the potential to contribute to the enhancement of the Urban Environment Quality Index. The study proposes and substantiates four principles of compactness: spatial connectivity; ensured accessibility of urban areas; prioritization of the street-and-road network by mobility type and context-sensitive design of street-and-road segments. The implementation of these measures will contribute to the scientific and methodological framework for developing small towns and support progress towards their sustainable development goals.

KEYWORDS: small town, compact city, managed shrinkage policy, territorial–spatial structure of the city, 15-minute city, spatial connectivity, accessibility, street-and-road network, sustainable development, urban planning development, spatial and geoinformation analysis

Acknowledgments. This article was prepared as part of the 2025 Federal Scientific Research Plan (FSRP) on topic No. 2.1.1.3 "Scientific and Methodological Foundations for Formulating an Urban Development Security Strategy for the Russian Federation as an Integral Part of the Implementation of the National Security Strategy of the Russian Federation". Head of the FSRP Plan for 2025.

FOR CITATION: Danilina N.V., Solnceva L.N. Principles for the formation of compact small towns in Russia with the aim of ensuring their urban safety. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1641-1653. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1641-1653 (rus.).

Corresponding author: Liia N. Solnceva, lika-nt@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегической задачей пространственно-территориального развития Российской Федерации в XXI в. является формирование системы расселения, способной обеспечить национальную безопасность страны и ее граждан. Национальный проект «Жилье и комфортная городская среда» также определяет безопасность как ключевую градостроительную характеристику любого поселения. Таким образом, обеспечение градостроительной безопасности урбанизированных территорий становится актуальным трендом современной политики развития городов и целью ведения градостроительной деятельности.

Наиболее уязвимые элементы системы расселения РФ — малые города, непосредственно создающие пространственный каркас страны и в которых проживает более четверти всего населения. В настоящее время насчитывается свыше 1100 городов, из которых более 70 % классифицируются как малые с численностью населения менее 50 тыс. человек. В бóльшей части из них наблюдается негативная тенденция снижения численности населения, которая сопровождается значительным ухудшением качества жизни населения. Оценка существующих проблем демонстрирует угрозу градостроительной безопасности малых городов, которая может привести к необратимым последствиям деградации городской среды. В 2024 г. Президент РФ в ходе оглашения послания Федеральному собранию подчеркнул важность сохранения и совершенствования малых городов, что вошло в повестку развития страны на ближайшие годы.

Цель обеспечения градостроительной безопасности заключается в создании благоприятных условий для жизнедеятельности жителей современных городов. Она осуществляется через комплекс мероприятий по организации городской среды таким образом, чтобы снизить риски возникновения негативных природных и техногенных явлений, способствующих снижению качества жизни в городах, и одновременно адаптировать среду под быстрое восстановление в случае их возникновения.

Градостроительная безопасность реализуется через комплекс мероприятий по преобразованию среды для повышения индекса ее качества. Основные направления реализации мероприятий определены национальным проектом «Жилье и комфортная городская среда» и представлены в табл. 1.

Специфика образования компактных городов заключается в том, что сжатие и уплотнение существующей городской структуры может идти двумя принципиальными путями:

1. Естественный процесс повышения компактности города, обусловленный девелоперской поли-

Табл. 1. Направления обеспечения градостроительной безопасности городов

Table 1. Directions for ensuring urban planning safety of cities

Аспект Aspect	Направления при реализации политики управляемого сжатия городов Directions in implementing the managed shrinkage policy of cities
Социальный аспект Social aspect	Смешанная высокоплотная застройка. Mixed high-density development. Нормативная инфраструктурная обеспеченность. Normative infrastructure provision. Общественные пространства. Public spaces. Разнообразие и нормативные условия доступа к инфраструктуре. Diversity and standard conditions of access to infrastructure. Кратчайшие транспортные сети. Shortest transport networks. Централизованные инженерные сети Centralized engineering networks
Экономический аспект Economic aspect	Развитие малого и среднего бизнеса. Development of small and medium enterprises. Экономия строительства транспортных коммуникаций. Cost savings in transport infrastructure construction. Экономия инженерных коммуникаций и ресурсов. Savings in utility networks and resources. Высокий инвестиционный потенциал высокоплотной застройки. Strong investment potential of high-density development. Экономия городских ресурсов Urban resource savings
Экологический аспект Environmental aspect	Ориентация на пешеходное движение, пассажирский транспорт. Focus on pedestrian and public transport mobility. Снижение количества автомобилей. Reduction in the number of cars. Рациональное использование природных ресурсов. Rational use of natural resources. Энергоэффективные технологии. Energy-efficient technologies. Технологии снижения антропогенного воздействия от источников его возникновения Technologies to mitigate anthropogenic impact at the source

тикой градостроительного развития среды в рамках реализации программы формирования комфортных и безопасных городов. Реализация мероприятий провоцирует естественный процесс стекания населения с пригородных и периферийных территорий в районы с более высоким уровнем качества городской среды и жизни населения.

2. Реализация программы городской политики по управляемому сжатию территорий городов через реализацию комплекса мероприятий по переселению жителей из аварийного фонда на территории с более высоким индексом качества городской среды.

В российском опыте концепция компактного города реализуется в условиях подхода управляемого сжатия территорий городов, применение которого приобретает актуальность для малых городов, уже столкнувшихся с деградацией городской среды. В рамках данной политики выполняется анализ существующей застройки в административных границах поселения; оценка инфраструктурной обеспеченности населения, эффективности использования городских ресурсов и территорий и их перераспределение [1].

В обоих случаях градостроительная безопасность обеспечивается внедрением принципов концепции компактности [2], применение которой способствует улучшению качества городской среды. Концепция определяет вектор развития многофункциональной, высокоплотной городской среды, обеспечивающей лучшие условия доступа населения к различным видам инфраструктуры [3–5].

К характеристикам градостроительного развития компактных городов, формируемых в результате реализации политики управляемого сжатия [6], относятся высокая плотность и пространственная системность застройки, лучшие условия доступа к инфраструктуре, меньшие затраты на строительство инфраструктуры при их максимальной наполняемости, кратчайшие трассы инженерных сетей, минимальные расстояния передвижений по уличнодорожной сети (УДС) [7–9]. Они определяют достижение целей градостроительной безопасности

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

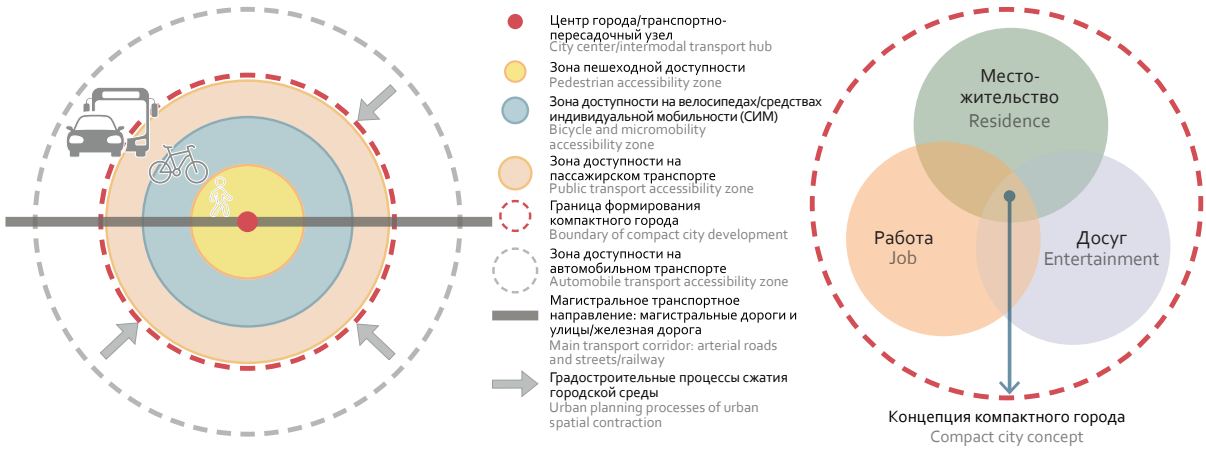


Рис. 1. Концептуальная модель компактного города как модель исследования

Fig. 1. Conceptual model of a compact city as a research model

городов путем создания компактных комфортных и устойчивых городов [10, 11].

В статье рассматриваются градостроительные аспекты создания компактных городов, формируемых на основе концепции 15-минутного города [12, 13]. В рамках исследования выделяются три ключевые цели их образования [14]:

• ориентация на снижение количества личного автотранспорта в городах и приоритетное развитие пешеходного движения, пассажирского транспорта и альтернативных видов индивидуальной мобильности;

• формирование многофункциональной городской среды с обеспечением преимущественно пешеходного доступа к социально-общественным услугам;

• высокое качество общественных городских пространств, обеспечивающих развитие бизнеса и эффективное использование каждого квадратного метра городской территории как минимум с двумя функциями.

Компактный город всегда развивается на определенной структуре УДС, обеспечивающей каркас планировочной структуры [15]. С исследовательской точки зрения актуальным является вопрос изучения существующих зависимостей между характеристиками уплотненной застройки и параметрами УДС [16]. Многие зарубежные труды направлены на изучение потенциала реализации концепции 15-минутного города [17–21]. Основным методом исследования служит пространственный анализ данных, параметрами выступают численность постоянного населения, плотность рабочих мест и инфраструктурных объектов, геометрические параметры УДС. Исследования в рамках концепции 15-минутного города плотно связаны с разработкой подходов к обеспечению пешеходной доступности городских объектов, что достигается путем комплексного сочетания трех факторов: плотности застройки, ее функционального разнообразия и условий доступа с УДС [22, 23].

Цель настоящего исследования — разработка принципов формирования компактной территориально-планировочной структуры малых городов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами исследования выбраны города России для реализации концепции управляемого сжатия. Города выбираются по следующим критериям:

• численность населения от 20 до 50 тыс. чел. и город относится к категории малых;

• фиксируется отрицательная динамика численности населения;

• города имеют моноцентричную транспортно-планировочную структуру.

В качестве границ формирования компактного города принята идея 15-минутной доступности инфраструктурных объектов, главную роль в которой играет начертание УДС (рис. 1).

Компактная форма транспортно-планировочной структуры обеспечивается тремя основными составляющими:

• совокупностью планировочных зон: жилых, общественно-деловых, производственных, рекреационных. Функциональное назначение зоны устанавливает градостроительный контекст и параметры УДС;

• размещением фокусов тяготения: мест приложения труда, объектов образования и медицины, торговых и развлекательных объектов, социально-бытовых сервисов, объектов отдыха, туризма, культуры и спорта. Плотность расположения фокусов тяготения в структуре городской ткани непосредственно определяет компактность структуры;

• структурой мобильности населения: распределением поездок по различным видам транспорта — личный транспорт, коммерческий, наземный пассажирский городской транспорт и перемещение пешком.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

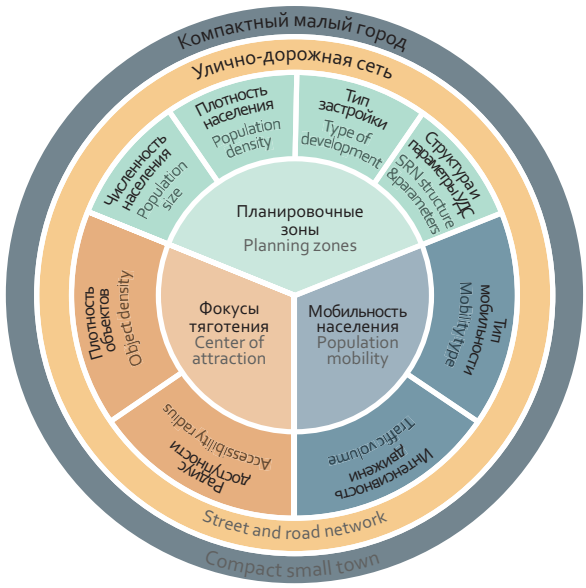


Рис. 2. Теоретическая модель исследования

Fig. 2. Theoretical research model

Методология исследования основана на анализе предпосылок формирования компактной пространственно-планировочной формы города на базе оценки параметров работы УДС, описание которой приведено на рис. 2 в виде теоретической модели исследования.

Исследование базируется на поэтапном пространственном анализе малых городов с целью выявления признаков компактности. На рис. 3 представлен порядок исследования, который включает 4 этапа:

1-й этап — сбор исходных данных: численность населения, количество фокусов тяготения и их пространственное расположение, структура и параметры УДС;

2-й этап — оценка параметров 15-минутной доступности для четырех типов мобильности: пешеходное движение, велосипеды и средства индивидуальной мобильности (СИМ), пассажирский транспорт и автомобили;

3-й этап — проверка пространственной связности городских территорий улично-дорожной сетью на основе анализа морфологических характеристик застройки;

4-й этап — разработка подходов к формированию компактной территориально-планировочной структуры малых городов.

Исследование проведено с использованием программного обеспечения QGIS, в том числе с применением следующих модулей: ORS Tools, QNEAT3, данных из открытых баз данных: OpenStreetMap, Openrouteservice, Яндекс-карты, на основе сведений Федеральной службы государственной статистики.



Рис. 3. Порядок проведения исследования

Fig. 3. Research procedure

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны следующие города: г. Истра, Московская область; г. Гусев, Калининградская область; г. Невьянск, Свердловская область. Все города относятся к классу малых городов России с одинаковым размером территории в административных границах 15–16 км^2, но для исследования были выбраны разные по численности населения от 47 до 22 тыс. чел. Общими характеристиками являются моноцентричность их транспортно-планировочной структуры и отрицательная динамика численности населения.

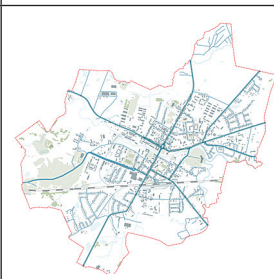
На *первом этапе* исследования проводился сбор исходных данных, результаты которого представлены в табл. 2.

Город Истра расположен в Московской области и входит в состав Московской агломерации. Город сформирован вдоль направления железной дороги, на котором расположены две станции — Новоиерусалимская и Истра, осуществляющие прямую связь с Москвой. Компактная городская среда формируется на основе концепции транзитно-ориентированного проектирования, в котором транспортно-пересадочные узлы скоростного пассажирского транспорта и территория исторически сложившейся застройки города образуют моноцентрическое ядро, вокруг него происходит градостроительное развитие территорий и ее уплотнение. Таким образом, в существующем процессе развития города наблюдаются процессы ее уплотнения по мере приближения к центральному ядру города, что отвечает целям повышения компактности города. Наличие в городе более 800 различных фокусов тяготения населения говорит о довольно высоком уровне социально-общественного развития и обеспеченности населения различными видами инфраструктуры.

Город Гусев расположен в Калининградской области, которая относится к группе активно развивающихся регионов. Меньшие плотность населения, количество фокусов тяготения населения и их плотность расположения говорят о более худших условиях градостроительной безопасности в городе, по сравнению с Истрой. Город также расположен в непосредственной близости от Калининграда и обслуживается прямой веткой пассажирского железнодорожного сообщения и одноименной станцией

Табл. 2. Сбор исходных данных (OpenStreetMap + QGIS)

Table 2. Collection of initial data (OpenStreetMap + QGIS)

Показатели Indicators	г. Истра, Московская область Istra, Moscow Region	г. Гусев, Калининградская область Gusev, Kaliningrad Region	г. Невьянск, Свердловская область Nevyansk, Sverdlovsk Region
			
Численность населения, тыс. чел. Population size, thous. people	46,46	28,82	22,03
Общее количество фокусов тяготения, шт. Total number of centres of attraction, units	848	201	159
Общая площадь в административных границах, км^2 Total area within administrative boundaries, sq. km	16,19	15,94	16,07
Плотность населения, тыс. чел./км^2 Population density, thous. people/sq. km	2,87	1,81	1,37
Плотность фокусов тяготения, шт./км^2 Density of centres of attraction, units/sq. km	25	13	10

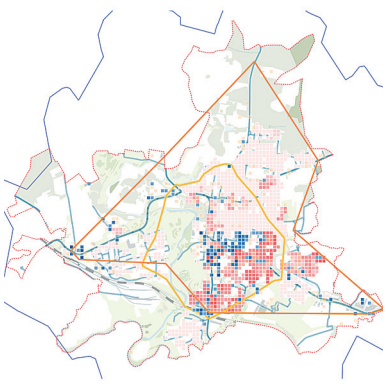
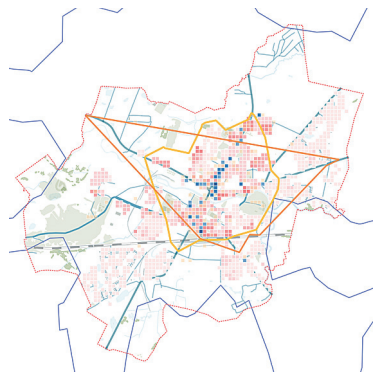
Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

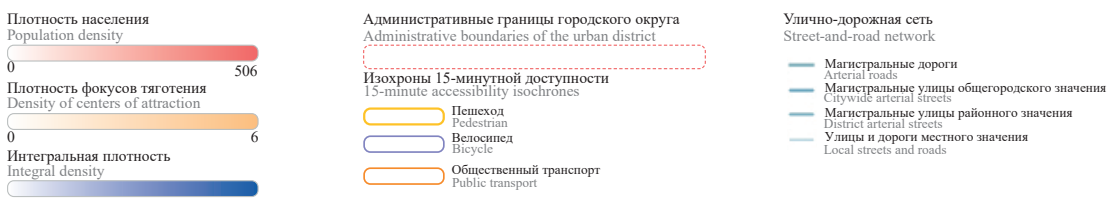
Гусев. Компактное развитие города формируется в радиусе 4–5 км от центра города.

Город Невьянск находится в Свердловской области на расстоянии порядка 50 км от г. Нижний Тагил. Центральная часть города формируется на пересечении магистральных улиц городского значения в совокупности с центральным транспортно-пересадочным узлом, формируемым одноименной станцией железной дороги и автостанцией. По показателям инфраструктурной обеспеченности город имеет низкие критерии по количеству и плотности размещения фокусов тяготения. Необходимость создания компактной городской структуры обуславливается падением численности населения,

Табл. 3. Результаты пространственного анализа методом изохрон 15-минутной доступности компактных городов (источник: OpenStreetMap, Openrouteservice + QGIS, ORS Tools, QNEAT3)

Table 3. Results of spatial analysis using the 15-minute accessibility isochrone method for compact cities (source: OpenStreetMap, Openrouteservice + QGIS, ORS Tools, QNEAT3)

г. Истра, Московская область Istra, Moscow Region	г. Гусев, Калининградская область Gusev, Kaliningrad Region	г. Невьянск, Свердловская область Nevyansk, Sverdlovsk Region
		



Дополнительные параметры оценки компактности малых городов Additional indicators for assessing the compactness of small towns	г. Истра Istra	г. Гусев Gusev	г. Невьянск Nevyansk
Доля населения, сосредоточенная в радиусе 15-минутной пешеходной доступности, % Percentage of population located within a 15-minute pedestrian accessibility radius, %	74,0	71,6	64,9
Доля фокусов тяготения, сосредоточенная в радиусе 15-минутной пешеходной доступности, % Percentage of centres of attraction located within a 15-minute pedestrian accessibility radius, %	69,0	88,0	84,9
Плотность УДС в радиусе 15-минутной пешеходной доступности, км/км^2 Density of the street-and-road network within a 15-minute pedestrian accessibility radius, km/sq. km	6,1	6,8	9,6
Доля площади радиуса 15-минутной велосипедной доступности от общей площади города, % Percentage of the area within a 15-minute bicycle accessibility radius relative to the total city area, %	98,8	89,3	94,3
Доля населения в радиусе 15-минутной доступности на общественном транспорте, % Percentage of population within a 15-minute public transport accessibility radius, %	77,5	65,8	49,8

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

низкой плотностью населения, низким уровнем инфраструктурной обеспеченности и соответственно низкой эффективностью использования городских территорий. С точки зрения исследования данный город имеет тенденцию к внедрению принципов управляемого сжатия для обеспечения градостроительной безопасности населения.

Выбранные для исследования города представляют три разных случая формирования компактной городской структуры: от самой развитой в Истре, развивающейся в г. Гусев и перспективной для г. Невьянска. Рассмотрение данных градостроительных ситуаций позволит повысить объективность результатов исследования и сравнить показатели для различных градостроительных ситуаций.

На втором этапе исследования проводится оценка параметров 15-минутной доступности для различных видов транспорта методом построения изохрон. Результаты пространственного анализа приведены в табл. 3.

В ходе исследования для четырех типов мобильности (пешеход, велосипед, наземный городской пассажирский транспорт, автомобиль) построены изохроны 15-минутной доступности. С целью расчета приняты средние показатели скорости движения для: пешеходов — 5 км/ч, велосипедистов — 15 км/ч, наземного городского пассажирского транспорта — 20 км/ч, автомобильного транспорта — 60 км/ч. Для картографической визуализации плотности населения и плотности фокусов тяготения была использована сетка с шагом 100 м, классификация по плотности населения отобрана по 10 классам, что обеспечило пространственную дискретизацию данных. С целью наглядного отображения дополнительно отображена интегральная плотность фокусов тяготения и плотности населения.

Доля населения и фокусов тяготения, сосредоточенная в зоне пешеходной доступности в геометрическом центре малого города, отражает моноцентричность и является одним из показателей компактности. Практически полное покрытие административных границ города 15-минутной велосипедной доступностью (от 89,3 до 98,8 %) отражает компактность малого города и способствует политике отказа от индивидуального автомобильного транспорта. Велосипедное движение может быть рассмотрено в качестве альтернативного типа мобильности для совершения регулярных поездок в трудовых целях.

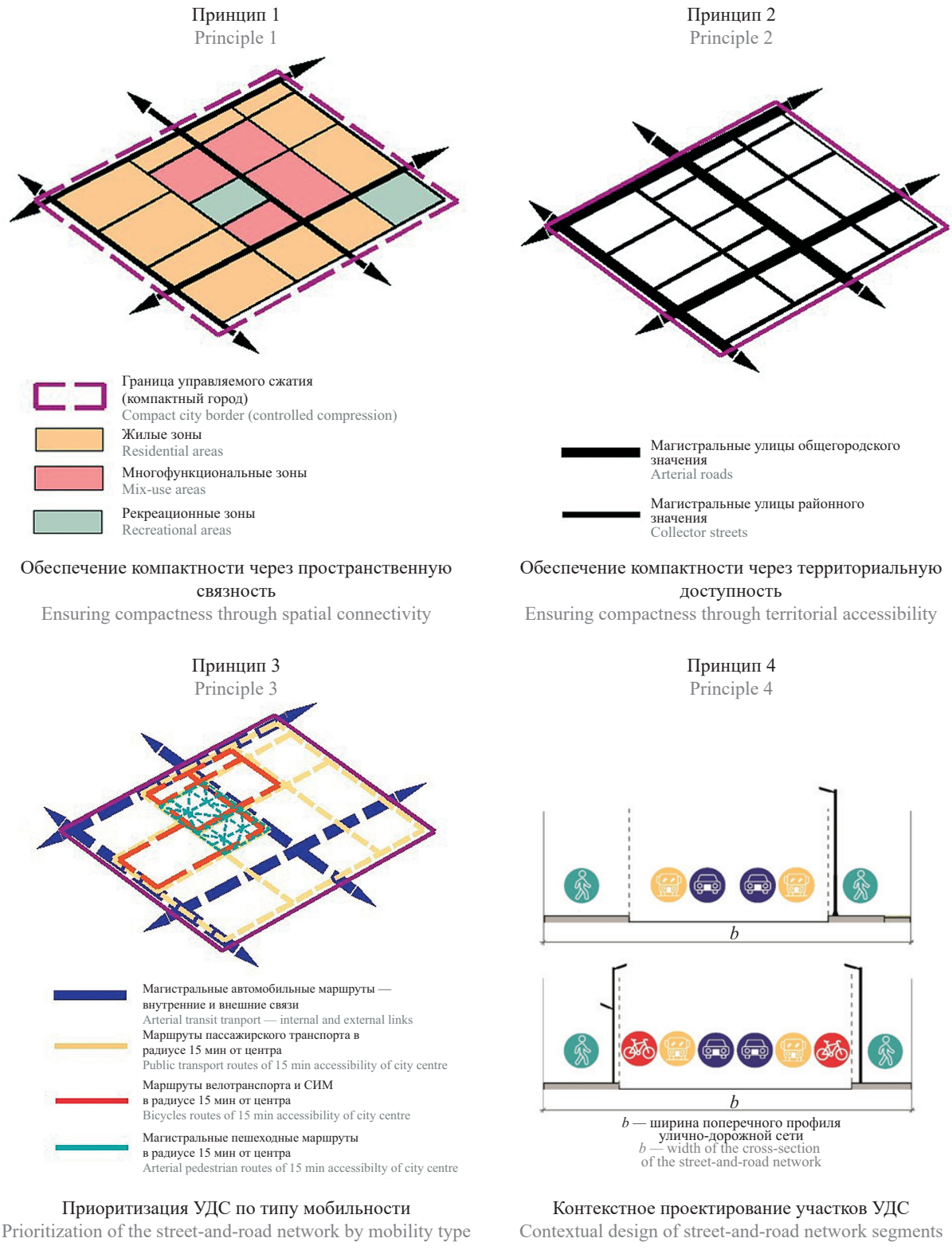
Высокая доля населения, сосредоточенная в зоне 15-минутной пешеходной доступности, отражает плотную и равномерную жилую застройку в центре малого города. Высокий показатель доли населения в зоне 15-минутной доступности на общественном транспорте в г. Истра демонстрирует хорошую организацию маршрутной сети, а в г. Невьянске рекомендуется рассмотреть дополнительное включение участков УДС в маршруты движения.

Табл. 4. Показатели морфологического анализа характеристик улично-дорожной сети (источник: OpenStreetMap + QGIS, ORS Tools, QNEAT3)

Table 4. Indicators of morphological analysis of street-and-road network characteristics (source: OpenStreetMap + QGIS, ORS Tools, QNEAT3)

Расчетная зона Assessment zone	Показатель Indicator	г. Истра Istra	г. Гусев Gusev	г. Невьянск Nevyansk
Изохрона 15-минутной пешеходной доступности Isochrone of 15-minute pedestrian accessibility	Плотность УДС, км/км^2 Density of the street-and-road network, km/sq. km	6,1	6,8	9,6
	Средняя длина уличного отрезка, м Average length of street segment, m	141	131	254
	Частота перекрестков, шт./км^2 Frequency of intersections, units/sq. km	30	27	42
Изохрона 15-минутной доступности на общественном транспорте Isochrone of 15-minute public transport accessibility	Плотность УДС, км/км^2 Density of the street-and-road network, km/sq. km	5,5	6,7	9,7
	Средняя длина уличного отрезка, м Average length of street segment, m	182	145	209
	Частота перекрестков, шт./км^2 Frequency of intersections, units/sq. km	25	26	36
Изохрона 15-минутной велосипедной доступности Isochrone of 15-minute bicycle accessibility	Плотность УДС, км/км^2 Density of the street-and-road network, km/sq. km	4,2	2,6	7,6
	Средняя длина уличного отрезка, м Average length of street segment, m	202	222	348
	Частота перекрестков, шт./км^2 Frequency of intersections, units/sq. km	21	8	29

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



Обеспечение компактности через пространственную связность
Ensuring compactness through spatial connectivity

Обеспечение компактности через территориальную доступность
Ensuring compactness through territorial accessibility

Приоритизация УДС по типу мобильности
Prioritization of the street-and-road network by mobility type

Контекстное проектирование участков УДС
Contextual design of street-and-road network segments

Рис. 4. Принципы формирования компактной территориально-планировочной структуры с целью обеспечения градостроительной безопасности малых городов

Fig. 4. Principles for developing a compact urban spatial structure to ensure the urban planning safety of small towns

Третий этап заключался в проверке пространственной связности городских территорий путем формирования структуры УДС.

Проверка связности каркасов по зонам 15-минутной доступности проведена на основании морфологических характеристик сети, что позволило определить степень насыщенности и проницаемости городской среды. Результаты проверки связности каркасов представлены в табл. 4. Выполненный анализ показывает, что в малых городах наиболее высокие показатели

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

связности УДС наблюдаются в центральной части, обеспечивая возможность реализации пешеходного приоритета. При переходе к последующим зонам показатели связности снижаются, что отражает разрежение УДС от центра к периферии малого города.

Наиболее развитую и проницаемую структуру отражает каркас в г. Невьянске, высокую плотность сети по всем расчетным зонам. В сравнении показателей анализа г. Гусев занимает промежуточное положение по значениям плотности и средней длины уличных отрезков, что также показывает эффективную структуру, а в г. Истра каркас более разряжен, плотность перекрестков наименьшая, особенно в местах транспортной и велосипедной доступности, однако стоит обратить внимание на значительные площади территории в городе, отведенные под рекреационные зеленые зоны в водоохранной зоне р. Истра. Вышеуказанная разница в показателях плотности при близких по значениям площадях в административных границах городского округа напрямую зависит от баланса площадей, согласно функциональному зонированию и установленным административным границам.

На *четвертом этапе* по результатам исследования разработаны принципы формирования компактной территориально-планировочной структуры с целью обеспечения градостроительной безопасности малых городов (рис. 4).

Они разделены на две группы: 1, 2 подходы отвечают за формирование структуры городской застройки, 3 и 4 — за создание УДС как ее каркаса и границ. Для реализации политики управляемого сжатия необходима реализация комплексной политики интегрированного территориального и транспортного планирования.

1. *Обеспечение компактности через пространственную связность.* Пространственная связность городской среды обеспечивается путем минимизации пространственных разрывов, повышения пешеходной и велосипедной проницаемости и увеличения эффективности использования каждого квадратного метра городской территории.

2. *Обеспечение компактности через территориальную доступность.* Территориальная доступность обеспечивается условиями планировочной организации УДС, соответствия ее плотности нормативным показателям. Оценка компактности проводится путем вычисления доли территорий застройки, находящихся в зоне пешеходной и транспортной доступности от центральной планировочной зоны города, которая может быть представлена исторически сложившимся центром города, центральным транспортно-пересадочным узлом или их совокупностью. Целевым показателем может выступать значение 90%-ного размещения городской застройки в зоне 15-минутной пешеходной или транспортной доступности от центра города. По мере удаления от центральной планировочной зоны города уменьшаются показатели плотности, многофункциональности застройки и плотности УДС.

3. *Приоритизация улично-дорожной сети по типу мобильности.* Формирование приоритетов в зависимости от типа мобильности эффективно для структуры компактного моноцентричного города. Пешеходный приоритет в центральной части с наиболее высокими показателями плотности населения и плотности фокусов тяготения более эффективен в малом городе, а реализация инфраструктуры может способствовать новому типу мобильности в целях трудовых поездок.

4. *Контекстное проектирование участков улично-дорожной сети.* Контекстное проектирование предполагает морфологическое выражение мероприятий по приоритизации движения пешеходов, велосипедистов, общественного транспорта в планировочных решениях каждого из участков УДС в зависимости от его расположения относительно центральной планировочной зоны. Морфологическое выражение осуществляется через призму проектируемых геометрических параметров поперечных профилей и планов городских улиц. Результатом контекстного проектирования является функциональное зонирование территории городской улицы для целей реализации каждой из востребованных функций движения различных видов транспорта и пешеходов, остановки, парковки, отдыха, рекреации, получения услуг и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование и анализ отечественной и международной практики подтверждают потенциал высокой эффективности применения принципов компактного города при реализации политики управляемого сжатия городов с целью их устойчивого развития.

На основе многоэтапного пространственного анализа с учетом разработанной системы факторов установлено, что исследуемые города (Истра, Гусев, Невьянск) обладают ключевыми признаками компактной городской структуры. Полученные результаты отражают устойчивую взаимосвязь между плотностью городских функций и структурой УДС. Учитывая ограниченность выборки в представленном исследовании, полученные значения могут отражать только предварительное представление о характерных показателях, расчеты использованы для иллюстрации методического подхода и требуют валидации на широкой выборке. Разработанные подходы возможно использовать для формирования стратегии развития компактных малых городов России с целью достижения целевых показателей формирования комфортной среды жизнедеятельности населения и повышения эффективности проектов городского планирования. Стратегически результаты реализации подходов к созданию компактных городов будут способствовать повышению градостроительной безопасности городов России.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Орлова Н.А., Орлов Д.Н., Маслова Е.А.* Проблемы компактного города провинциальной России XXI века // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 1 (34). С. 101–108. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.16. EDN XSLDRO.

2. *Salim S., Lakshmi S.R.* Compact City as a Tool for Sustainable Urban Development // International Journal of Architecture and Planning. 2023. Vol. 3. Issue 1. Pp. 52–60. DOI: 10.51483/ijarp.3.1.2023.52-60. EDN UOOSEA.

3. *Мазаев Г.В.* Компактный город: критика определений // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2021. № 2 (49). С. 9–13. DOI: 10.25628/UNIIP.2021.49.2.002. EDN SIOAYK.

4. *Khavarian-Garmsir A.R., Sharifi A., Sadeghi A.* The 15-minute city: Urban planning and design efforts toward creating sustainable neighborhoods // Cities. 2023. Vol. 132. P. 104101. DOI: 10.1016/j.cities.2022.104101

5. A 15-Minute Town / ed. A. Bogacz, J. Zydorek. Pleszew : Pleszew Town and Commune, 2024. 40 p.

6. *Marjanović M., Sagot Better M., Lero N., Nedović-Budić Z.* Can Acceptance of Urban Shrinkage Shift Planning Strategies of Shrinking Cities from Growth to De-Growth? // Urban Planning. 2024. Vol. 9. DOI: 10.17645/up.6904. EDN QPJOKQ.

7. *Нотман О.В.* Концепция 15-минутного города как основа устойчивой модели развития мегаполиса в условиях современных рисков // Урбанистика. 2021. № 3. С. 73–85. DOI: 10.7256/2310-8673.2021.3.35086. EDN MVQPYB.

8. *Moreno C. The 15-Minute City: A Solution to Saving Our Time and Our Planet*. Wiley, 2024. 304 p.

9. *Bibri S.E., Krogstie J., Kärrholm M.* Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability // Developments in the Built Environment. 2020. Vol. 4. P. 100021. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100021. EDN MMRVCA.

10. *Allam Z., Bibri S.E., Chabaud D., Moreno C.* The '15-Minute City' concept can shape a net-zero urban future // Humanities and Social Sciences Communications. 2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1057/s41599-022-01145-0

11. *Jama T., Tenkanen H., Lönnqvist H., Joutsiniemi A.* Compact city and urban planning: Correlation between density and local amenities // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2024. DOI: 10.1177/23998083241250264. EDN CLKBMN.

12. *Wang H., Tsoi K.H., Loo B.P.Y.* An assessment framework for 15-minute Cities: Progress worldwide and the impact of urban form // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2025. Vol. 199. P. 104583. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104583

13. *Teixeira J.F., Silva C., Seisenberger S., Büttner B., McCormick B., Papa E., Cao M.* Classifying 15-minute Cities: A review of worldwide practices // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2024. Vol. 189. P. 104234. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104234. EDN HUHEQL.

14. *Balletto G., Ladu M., Milesi A., Borruso G.* A Methodological Approach on Disused Public Properties in the 15-Minute City Perspective // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 2. P. 593. DOI: 10.3390/su13020593

15. *Kuss P., Nicholas K.A.* A dozen effective interventions to reduce car use in European cities: Lessons learned from a meta-analysis and transition management // Case Studies on Transport Policy. 2022. Vol. 10. Issue 3. Pp. 1494–1513. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.02.001

16. *Drabicki A., Grythe H., Lopez-Aparicio S., Górska L., Gzyło C., Pyzik M.* Modelling the influence of suburban sprawl vs. compact city development upon road network performance and traffic emissions // Transportation Research Procedia. 2025. Vol. 86. Pp. 371–378. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.04.047

17. *AbdelFattah L., Deponte D., Fossa G.* The 15-minute city: interpreting the model to bring out urban resiliencies // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 60. Pp. 330–337. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.043

18. *Hosford K., Beairsto J., Winters M.* Is the 15-minute city within reach? Evaluating walking and cycling accessibility to grocery stores in Vancouver // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2022. Vol. 14. P. 100602. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100602

19. *Shoina M., Voukkali I., Anagnostopoulos A., Papamichail I., Stylianou M., Zorpas A.* The 15-minute city concept: the case study within a neighbourhood of Thessaloniki // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2024. Vol. 42. Issue 8. Pp. 694–710. DOI: 10.1177/0734242X241259926

20. *Gaglione F., Gargiulo C., Zucaro F., Cottrill C.* Urban accessibility in a 15-minute city: a measure in the city of Naples, Italy // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 60. Pp. 378–385. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.049

21. *Pira S., Hansson L.* Analyzing equity in transport planning using the 15-minute city approach. A case study of Oslo city, Norway // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2025. Vol. 200. P. 104633. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104633

22. *Allam Z., Bibri S.E., Chabaud D., Moreno C.* The Theoretical, Practical, and Technological Foundations of the 15-Minute City Model: Proximity and Its Environmental, Social and Economic Benefits for Sustainability // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 16. P. 6042. DOI: 10.3390/en15166042. EDN BKKBFK.

23. *Dovey K., Pafka E.* What is walkability? The urban DMA // Urban Studies. 2020. Vol. 57. Issue 1. Pp. 93–108. DOI: 10.1177/0042098018819727

Поступила в редакцию 30 июля 2025 г.
Принята в доработанном виде 27 августа 2025 г.
Одобрена для публикации 1 октября 2025 г.

Об авторах: **Нина Васильевна Данилина** — доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный научный сотрудник; **Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России)**; 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 29; РИНЦ ID: 686739, Scopus: 57192377385, ResearcherID: AAE-7301-2020, ORCID: 0000-0002-9465-6435; nina_danilina@mail.ru;

Лия Нодаровна Солнцева — магистрант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1301998, ORCID: 0009-0004-2358-1706; lika-nt@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Orlova N.A., Orlov D.N., Maslova E.A. Problems of compact cities of provincial Russia of the XXI century. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(1):(34):101-108. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.16. EDN XSLDRO.(rus.).

2. Salim S., Lakshmi S.R. Compact City as a Tool for Sustainable Urban Development. *International Journal of Architecture and Planning*. 2023; 3(1):52-60. DOI: 10.51483/ijarp.3.1.2023.52-60. EDN UOOSEA.

3. Mazaev G. Compact city: criticism of definitions. *Academic Bulletin of the UralNIIproekt RAASN*. 2021; 2(49):9-13. DOI: 10.25628/UNIIP.2021.49.2.002. EDN SIOAYK. (rus.).

4. Khavarian-Garmsir A.R., Sharifi A., Sadeghi A. The 15-minute city: Urban planning and design efforts toward creating sustainable neighborhoods. *Cities*. 2023; 132:104101. DOI: 10.1016/j.cities.2022.104101

5. *A 15-Minute Town* / ed. A. Bogacz, J. Zydorek. Pleszew, Pleszew Town and Commune, 2024; 40.

6. Marjanović M., Sagot Better M., Lero N., Nedović-Budić Z. Can Acceptance of Urban Shrinkage Shift Planning Strategies of Shrinking Cities From Growth to De-Growth? *Urban Planning*. 2024; 9. DOI: 10.17645/up.6904. EDN QPJOKQ.

7. Notman O. The concept of 15-minute city as the basis for the model of sustainable development of a megacity in terms of modern risks. *Urban Studies*. 2021; 3:73-85. DOI: 10.7256/2310-8673.2021.3.35086. EDN MVQPYB. (rus.).

8. Moreno C. *The 15-Minute City: A Solution to Saving Our Time and Our Planet*. Wiley, 2024; 304.

9. Bibri S.E., Krogstie J., Kärrholm M. Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*. 2020; 4:100021. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100021. EDN MMRVCA.

10. Allam Z., Bibri S.E., Chabaud D., Moreno C. The '15-Minute City' concept can shape a net-zero urban future. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2022; 9(1). DOI: 10.1057/s41599-022-01145-0

11. Jama T., Tenkanen H., Lönnqvist H., Joutsiniemi A. Compact city and urban planning: Correlation between density and local amenities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2024. DOI: 10.1177/23998083241250264. EDN CLKBMN.

12. Wang H., Tsoi K.H., Loo B.P.Y. An assessment framework for 15-minute Cities: Progress worldwide and the impact of urban form. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2025; 199:104583. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104583

13. Teixeira J.F., Silva C., Seisenberger S., Büttner B., McCormick B., Papa E., Cao M. Classifying 15-minute Cities: A review of worldwide practices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024; 189:104234. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104234. EDN HUHEQL.

14. Balletto G., Ladu M., Milesi A., Borruso G. A Methodological Approach on Disused Public Properties in the 15-Minute City Perspective. *Sustainability*. 2021; 13(2):593. DOI: 10.3390/su13020593

15. Kuss P., Nicholas K.A. A dozen effective interventions to reduce car use in European cities: Lessons learned from a meta-analysis and transition management. *Case Studies on Transport Policy*. 2022; 10(3):1494-1513. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.02.001

16. Drabicki A., Grythe H., Lopez-Aparicio S., Górska L., Gzyło C., Pyzik M. Modelling the influence of suburban sprawl vs. compact city development upon road network performance and traffic emissions. *Transportation Research Procedia*. 2025; 86:371-378. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.04.047

17. AbdelFattah L., Deponte D., Fossa G. The 15-minute city: interpreting the model to bring out urban

resiliencies. *Transportation Research Procedia*. 2022; 60:330-337. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.043

18. Hosford K., Beairsto J., Winters M. Is the 15-minute city within reach? Evaluating walking and cycling accessibility to grocery stores in Vancouver. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.* 2022; 14:100602. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100602

19. Shoina M., Voukkali I., Anagnostopoulos A., Papamichail I., Stylianou M., Zorpas A. The 15-minute city concept: the case study within a neighbourhood of Thessaloniki. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2024; 42(8):694-710. DOI: 10.1177/0734242X241259926

20. Gaglione F., Gargiulo C., Zucaro F., Cottrill C. Urban accessibility in a 15-minute city: a measure in the city of Naples, Italy. *Transportation Research Procedia*. 2022; 60:378-385. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.049

21. Pira S., Hansson L. Analyzing equity in transport planning using the 15-minute city approach. A case study of Oslo city, Norway. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2025; 200:104633. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104633

22. Allam Z., Bibri S.E., Chabaud D., Moreno C. The Theoretical, Practical, and Technological Foundations of the 15-Minute City Model: Proximity and Its Environmental, Social and Economic Benefits for Sustainability. *Energies*. 2022; 15(16):6042. DOI: 10.3390/en15166042. EDN BKKBFK.

23. Dovey K., Pafka E. What is walkability? The urban DMA. *Urban Studies*. 2020; 57(1):93-108. DOI: 10.1177/0042098018819727

Received July 30, 2025.
Adopted in revised form on August 27, 2025.
Approved for publication on October 1, 2025.

BIONOTES: **Nina V. Danilina** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief researcher; **Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation**; 29 Vernadsky ave., Moscow, 119331, Russian Federation; ID RSCI: 686739, Scopus: 57192377385, ResearcherID: AAE-7301-2020, ORCID: 0000-0002-9465-6435; nina_danilina@mail.ru;

Liia N. Solnceva — master's student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1301998, ORCID: 0009-0004-2358-1706; lika-nt@yandex.ru.

Authors' contribution: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 72.09:916.014
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1654-1665

Две концепции обновления сирийской архитектуры

Аммар Аасем, Валентин Никитович Ткачев
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Города Сирии исторически складывались по модели стихийной феодальной застройки, традиционной для Средней Азии и Ближнего Востока. Ее архаика препятствует модернизации жизни по нормам современности. Разрушение крупных городов создает повод для обновления застройки в формах, соединяющих архитектурные традиции и современность, что составляет основу концепции обновления, принятую в статье. Вторая концепция представлена гипотезой реосвоения пустыни вокруг Пальмиры, используя методы обводнения и формирования условий для сельскохозяйственных поселений. Обе концепции основаны на единой типологии пространственных единиц организации городской застройки.
Материалы и методы. Программы послевоенного восстановления опираются на анализ сложившегося синтеза восточной «ковровой» застройки и так называемого «европейского города» с попытками усреднения пространственных форм, удовлетворяющих как климатическим параметрам, так и современным нормам комфорта. Изучение мирового опыта восстановления разрушенных городов определяет спектр мер и приемов реконструкции застройки, ее типологического и функционального обновления. Параллельно исследованы конкретные меры возвращения Пальмире значения хозяйственного и культурного центра страны.
Результаты. Разработка и применение в практике восстановления планировочной единицы городской застройки (навахи — эквивалентной махалля среднеазиатских городов) позволит в короткие сроки восстановить городскую застройку унифицированной коллекцией типовых проектов, создать полноценную среду обитания сельских регионов на основе орошения. Показаны реальные предпосылки восстановления Пальмиры.
Выводы. Несмотря на тяжелую и неопределенную обстановку в стране, процесс восстановления разрушенного должен начаться сегодня, пусть в варианте предварительной модели решения проблемы временного расселения в расчете на последующую корректировку.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структура феодального восточного города, разрушения, типология новых форм жилого фонда, концепции обновления застройки, обводнение пустыни, реабилитация Пальмиры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Аасем А., Ткачев В.Н.* Две концепции обновления сирийской архитектуры // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1654–1665. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1654-1665

Автор, ответственный за переписку: Валентин Никитович Ткачев, valentintn@mail.ru.

Two Concepts of Renewal of Syrian Architecture

Ammar Aasem, Valentin N. Tkachev
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Historically, the cities of Syria were formed according to the model of spontaneous feudal buildings, traditional for Central Asia and the Middle East. Its archaism hinders the modernization of life according to modern standards. The destruction of large cities creates a reason for renovation of buildings in forms that combine architectural traditions and modernity, which forms the basis of the concept of renovation adopted in the article. The second concept is represented by the hypothesis of the redevelopment of the desert around Palmyra, using irrigation methods and creating conditions for agricultural settlements. Both concepts are based on a single typology of spatial units of urban development organization.
Materials and methods. Post-war reconstruction programmes are based on an analysis of the existing synthesis of oriental "carpet" buildings and the so-called "European city" with attempts to average spatial forms that meet both climatic parameters and modern standards of comfort. The study of the world's experience in rebuilding destroyed cities determines the range of measures and techniques for building reconstruction, its typological and functional renewal. At the same time, specific measures have been investigated to return Palmyra to the importance of the economic and cultural center of the country.
Results. The development and application in the practice of restoring the planning unit of urban development (Navahi — equivalent to the mahalla of Central Asian cities) will allow in a short time to restore urban development with a unified collection of standard projects, create a full-fledged habitat for rural regions based on irrigation. Creating real prerequisites for the restoration of Palmyra.
Conclusions. Despite the difficult and uncertain situation in the country, the process of rebuilding what was destroyed should begin today, even if it is based on a preliminary model for solving the problem of temporary resettlement with a view to subsequent adjustments.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

© А. Аасем, В.Н. Ткачев, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

KEYWORDS: the structure of the feudal eastern city, destruction, typology of new forms of housing stock, concepts of renovation, irrigation of the desert, rehabilitation of Palmyra

FOR CITATION: Aasem A., Tkachev V.N. Two Concepts of Renewal of Syrian Architecture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1654-1665. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1654-1665 (rus.).

Corresponding author: Valentin N. Tkachev, valentintn@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Посмотрим на карту Сирии. Сегодня в цивилизованной зоне освоенной территории страны находится только морское побережье — объект перманентной европейской колонизации с древнейших времен. Большая часть страны занята кочевниками Сирийской пустыни с ее геометрическим центром — Пальмирой, в античности транзитным пунктом караванного пути от портового Тира (Тартуса) до китайского Сианя (рис. 1).

С открытием дальних морских маршрутов угас интерес к Великому шелковому пути, и Пальмира надолго замерла как брошенный город, подобно Баальбеку и набатейской Петре — все расположены неподалеку друг от друга и свидетельствуют об активном историческом прошлом региона. Только в XVII в. сюда стали наведываться европейские путешественники и авантюристы.

В период с VIII по IV тысячелетие до н. э. пустынные сегодня территории Африки, Малой Азии и Аравии были цветущим раем; как полагают, в 2300 гг. до н. э. смещение ядра планеты вызвало гигантское цунами, уничтожившее цивилизацию. Образовались песчаные пустыни. Археологические раскопки в Сирии обнаружили под слоем песка чернозем [1].

Вади — русла пересыхающих рек, обозначают места немногочисленных оазисов, в том числе Тадмор, пункт окончательной экипировки караванов шелкового пути, получивший при римском императоре Тиберии в 407 г. название Пальмира [2–5].



Рис. 1. Географическая карта Сирии

Fig. 1. Geographical map of Syria



Рис. 2. Общий вид Пальмиры с разрушениями

Fig. 2. General view of Palmyra with destruction

Заметная часть ее истории, отмеченная активным строительством, сложилась в античность и эпоху эллинизма, когда процветавшие земли «Плодородного полумесяца» привлекали завоевателей, которым было тесно на Апеннинском полуострове.

С Пальмирой связана история царицы Зенобии, выступившей против римлян в III в., однако император Аврелиан принудил ее сдаться. С именами женщин, царствовавших в древности, всегда связаны романтические истории.

Якобы в X в. до н. э. иудейский царь Соломон укреплял оборону Пальмиры для защиты от набегов арамейцев. Римляне также пытались укрепить город, застраивая его культовыми объектами. Сооружения неоднократно разрушались и восстанавливались. Поэтому Пальмира в дошедшем до нас виде имеет крайне беспорядочную планировку, состоящую из отдельных эллинистических ансамблей (рис. 2).

Амбициозные желания Рима закрепить за собой восточные территории обозначены настолько грандиозными архитектурными замыслами, что бóльшая их часть осталась незавершенной, как и Баальбек, краснопесчаные храмы Петры.

Существует историческая закономерность: цветущие оазисы пустынь приходят в запустение с активизацией хищнических набегов, как и сегодня.

С началом XXI в. Сирия оказалась в сфере междоусобных и религиозных войн, собравших фанатичных боевиков со всего света, поощрявшихся иностранными нефтедобывающими компаниями.

Разорялись города, храмы Пальмиры были объявлены враждебными культуре ислама.

Религиозные фанатики взрывали архитектурные объекты, разбивали и выламывали из разрушаемых памятников скульптуру на продажу [6].

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



Рис. 3. Средневековая пастораль с видом на античные руины

Fig. 3. Medieval pastoral with a view of ancien.ruins

Российские археологи сделали съемки Пальмиры в 2016 г., когда страна находилась под контролем правительственных войск. Однако боевики вновь овладели городом. В итоге они взорвали храмы Баалшамина, Бэла, триумфальную арку и театр.

Но история открытия Пальмиры после средневекового забвения по-своему интересна.

В начале XVI в. в моду вошли открытия не только новых культур, но и античности, изображаемой в пасторалях (рис. 3).

В начале XVII в. Пальмиру упоминают (не видя ее) итальянский путешественник Пьетро делла Валле, затем английский пастор Галифакс.

В середине XVIII века в Пальмире высадился «десант» богатого английского мецената Р. Вудса и ирландского археолога Дж. Докинга; в его составе были не только историки, архитекторы и художники, но и мастера-каменотесы.

Популяризатор истории Ю. Абарин полагает, что три года экспедиции потрачены на создание из руин бутафорского ансамбля, который можно было бы представить культурному миру как сохранившийся памятник, достойный интереса и прославляющий организатора исследований. Надо отметить, что эпоха европейского Возрождения и последующих веков снискала славу времен фальсификатов [7].

История «достраивания» исторического памятника до состояния зрелого визуального впечатления напоминает интригующие действия Г. Шлимана на руинах Трои — уже в середине XIX в.

Последнее открытие Сирии активной колонизацией англичанами и французами присредиземноморских африканских и арабских республик состоялось после войны 1941–1946 гг. За это время стабилизировалась архитектура городов в виде ковровой застройки в мусульманских традициях организации семейной среды обитания, встроенной в общинные комплексы — районы минтак [8–13]. Построены регулярные кварталы европейской архитектуры с восточными оттенками стилистики.

Как объект расшатывания государственного строя и провоцирования внутренних конфликтов в добившихся самостоятельности средиземноморских республиках Сирия подверглась экономическому и политическому прессингу.

В результате города были разрушены, некоторые до основания, распалась система инфраструктуры, усилились миграционные потоки людей, лишившихся жилья, нарушилась общая система жизнеобеспечения, при отсутствии которой город умирает (рис. 4).

По поводу Пальмиры до сих пор не возникало никаких идей, кроме охраны руин и сохранившихся строений, до которых не дошли мародеры.

Бóльшая часть территории, окружающей Пальмиру, бывшую «невесту пустыни», представляет отставший более чем на 100 лет от цивилизации анклав обитания первобытного кочевничества.

А ведь возвращение ее к жизни возможно, дело только в обводнении территории и урегулировании социальных конфликтов, суть которых ничтожна,

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



Рис. 4. Разрушения г. Хомс, Сирия

Fig. 4. Destruction of the city of Homs, Syria

как и менталитет тех людей, зомбированных религиозным ослеплением и интересами вождей бандформирований. Когда вернется духовное просветление пока неизвестно. Но, как бы то ни было, надо начинать готовить будущее, помня о прекрасном прошлом. Нельзя допускать, чтобы страна древней культуры окончательно погибла в перестрелках невежественных бандитов.

В безопасной и комфортной среде люди становятся лучше, их психология настраивается на цивилизованный образ жизни, закрепляемый новой архитектурой, синтезирующей традиции и современность, обновление не должно быть резким, убивающим прошлое.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Социально-экономические предпосылки восстановления разрушений, а также обновление методов архитектурного проектирования подкрепляются расширенными возможностями ввода новых приемов строительной практики, систем преодоления природно-климатических обстоятельств, местных конфликтов, препятствующих освоению территорий.

Уже изучены и опробованы на практике приемы стабильного поддержания как комфортности обитания, так и локального обеспечения жизненных условий в виде создания и укрепления продовольственно-бытовой базы (паттернов жизнеобеспечения [14]), производства, которые, в свою очередь, гарантируются постоянством водоснабжения.

Именно это обстоятельство допускает расширение ареала обитания за пределы прибрежных территорий у моря и вдоль рек.

Однако только ортодоксальное извлечение воды из местных источников и крупных рек ее откачиванием не бесконечно, чему есть примеры исторического угасания цветущих городов, исчерпавших свои водные ресурсы или оказавшихся в зоне гидрогеологических катастроф. Сегодня в их числе Пальмира.

К настоящему исследованию привлечены материалы, характеризующие уровень интенсивности водозабора из существующих источников Сирии и перспективы решения проблем орошения в условиях потепления климата и иссушения сельскохозяйственных территорий. Сама по себе проблема не решится, хотя пророк Мухаммед вещал: «… земля арабов снова станет лугами и реками»[1].

Конечно, можно рассчитывать на эпизодические обильные дожди, которые некогда (1838 г.) наполнили Вади-Рам в Аравийской пустыне, образовав озеро площадью более 500 км^2, просуществовавшее два года[2].

Изучение проблем ирригации выявило, что из земли уже откачали 80 % грунтовых вод. В отдельных местах до нее можно добраться только на глубине 1 км.

Разработаны межгосударственные соглашения пользования водой Евфрата, рассчитывающие на получение 15,8 км^3 в год из общего объема речных ресурсов. Ограничение водопотребления отразилось на сокращении половины сельскохозяйственных площадей.

[1] Запретные пророчества — IERA 1. Sahih Muslim, 157.

[2] Дренажные каналы, вади. Инженерный корпус армии США. Рабочая группа по процессам в пустыне. Knowledge Sciences, inc. 2008.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

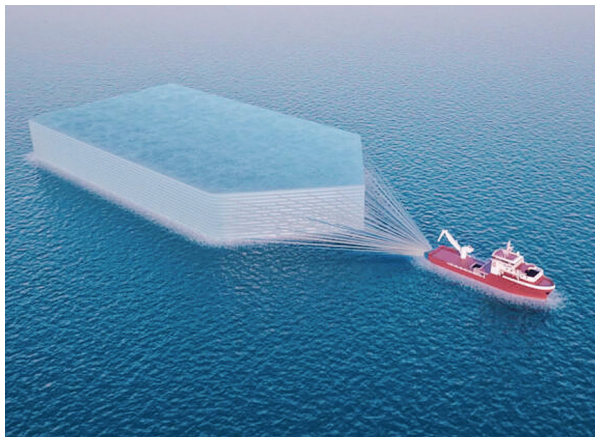


Рис. 5. Транспортировка айсберга к месту водопотребления

Fig. 5. Iceberg transportation to the place of water consumption

Высокие технические и финансовые издержки уже не являются препятствием для разработки и внедрения в практику различных изобретательных приемов добычи и распределения воды, куда входят, в частности, рационализация капельного растениеводства (Израиль, пустыня Негев), круговая ирригация экономным орошением веерным поливом обширных площадей артезианскими скважинами, старинный способ аккумуляции воды охлаждаемыми ночью поверхностями. Сюда же входят опреснение морской воды, накопление льда в зимний период, транспортировка айсбергов к зонам водопотребления, ограничения водооборота в замкнутом пространстве и т.п. (рис. 5).

Актуальным остается использование и неявных источников влаги под руслами вади (арройо), на чем пока держатся оазисы Аравийской пустыни и монгольской Гоби, сквозь пески которых проступают болотистые участки, где живут лягушки, некогда здесь было континентальное море.

Характерно, что при стартовом активном водоснабжении территории сами в дальнейшем поддерживают влажность с помощью жителей, противостоящих песчаным бурям.

Кроме прямых государственных акций в борьбе за воду целесообразно поддерживать либертарианство — «поддержание» усилий местного населения в этой деятельности.

До сих пор «живет» идея провести к зонам земледелия каналы от сибирских рек, бесполезно сбрасывающих воду в Ледовитый океан и при потеплении климата образующих гигантское море в зоне Обской поймы.

Транспортировка айсбергов к Тартусу может занять 140 дней, к тому же в процессе буксировки айсберг будет таять и может перевернуться. Тем не менее компания «Роснефть» рискнула отодвинуть от нефтяной платформы айсберг весом более 1 млн т.

Стоит формовать айсберги в виде баржи, этим вопросом занимается российская компания ICETECH.

От режима истощения грунтовых вод (2 км^3 в год) полностью зависит урбанизация центральных регионов Сирии.

Динамика роста населения с 1960 по 2024 г. показывает цифры от 4,7 до 24,7 млн чел. Официальный показатель на 2025 г. — 24,7 млн чел., однако выросший уровень миграции последнего года дает неустойчивые данные и, скорее всего, покажет отрицательный прирост.

Постконфликтные регионы разрушений городов являют катастрофическую картину утраты 75–100 % застройки [6].

Методология исследования степени разрушений в сопоставлении с довоенным состоянием помогает составить объективную картину изменений, взвесить вопросы восстановления в прежнем виде или перехода на современные принципы размещения и типологии зданий, компенсирующих потери.

Объем разрушений в городах зависит от состоявшихся военных действий в центре или на периферии.

Утрачены привычные трассы коммуникаций, недоступны или уничтожены элементы инфраструктуры, т.е. города лишены нормальных систем жизнеобеспечения мирного времени. В известной мере степень разрушений дает карт-бланш выбору — реставрировать или реконструировать.

Подробному анализу разрушений и выпадению из сферы пользования городских сооружений различного назначения (акцент на общественные здания) сегодня посвящено много работ.

Задача данной статьи — выявить характерные утраты наиболее типичных сооружений старого и нового режима обитания для конкретизации типологии восстановительных работ по: 1) «ковровой» застройке основных территорий; 2) анклавам «европейской» застройки. Они должны составить предметный объем программы реконструкции.

Обзор карт разрушений нескольких крупных городов по трассе Алеппо – Дамаск с выявленными районами наиболее значительных разрушений показывает, что для решения видов реабилитации наибольшее внимание должно быть уделено центрам городов с исторической застройкой до- и постколониальной эпохи как объектам выраженной структурной организации.

Минимальные разрушения пригородов ориентируют планирование восстановительных работ до того, как эти территории, как правило инвентарной застройки, начнут вновь осваивать самостоятельными усилиями жители этих районов, лишенные своих жилищ, чтобы не создавать конфликтных ситуаций.

Для решения восстановительных работ в ковровой застройке, потребующей первоочередного внимания для удовлетворения потребностей в жилье для большинства горожан, целесообразно найти усредненные решения по данным сложившейся

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

практики и посредством модернизации (унификации застройки, удешевления, сокращения сроков возведения) дать программу восстановления прежде всего рутинной традиционной застройки, которая бы удовлетворяла минимальные запросы аборигенов, решивших на покидать родные места в надежде на быстрое восстановление.

За 4 года конфликтов требования антиправительственной оппозиции переродились в бесконтрольные и хищнические налеты религиозных мятежников.

Желания эмиграции трудно осуществимы, Европа перенасыщена мигрантами из стран Востока. Международные силы «сдерживания» давят страну нефтяным прессингом, ухудшая и без того полуживую экономику, производительные силы.

Решительным перевесом сил не обладает ни одна из противоборствующих сторон. Среди полностью разрушенных городов бродят люди, устраивающие себе приют на пепелищах.

Это усугубляет положение с ориентацией и началом восстановительных работ, тем более что они охватывают обе концепции: городскую реабилитацию и реосвоение пустынных территорий с центром в Пальмире.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фильтрация информации по фактическому суициду страны должна дать основания к осознанию противоборствующими сторонами остроты положения, ответственности перед историей и будущими поколениями.

Возможно, это будет делом синклита старейших граждан, способных призвать народ к мирному сосуществованию, проникнуться общественными идеалами, примирить религиозные и этнические противоречия во имя будущего. Иначе Сирия вскоре превратится в безжизненную пустыню, занесенную песком.

В дальнейших рассуждениях авторы исходят из того, что мир, по меньшей мере в идеале, находится на пути к согласию, возобладанию здравого смысла и ответственности.

Решение основной концепции — возвращение к нормальной жизни населенных пунктов, восстановление предметной среды и обитаемого пространства в пределах уже освоенных территорий, может быть, даже по кальке существовавшей застройки. Эта акция имеет важное психологическое значение, как это показал опыт восстановления разрушенных городов Европы: Сталинграда, Варшавы, Гавра, Дрездена — буквально до деталей.

Когда-нибудь человечеству станет стыдно за те варварские «деяния», которыми прикрывались «благородные» намерения мстительности.

Реальность восстановления жилого фонда в его бывшем облике имеет, безусловно, свою историческую ценность, удовлетворение адекватно воссозданным миром.

Но, может быть, уже созрели альтернативы замещения устаревших в своем техническом состоянии сооружений (или утративших культурную парадигму прошлого) новыми современными комфортными зданиями, в дизайне которых может быть отдана дань символике национальных традиций?

В частности, при восстановлении многоэтажной застройки имеет смысл не потерять традиций планировки типичного средиземноморского жилища атриумного типа с квартирами для многочисленных семей (рис. 6).

Возможны планировочные варианты для заселения семьями среднего и высокого достатка (рис. 7).

Важнее всего, однако, сохранить дух традиционной ковровой фоновой застройки одно- и двухэтажными усадебными домами с атриумным пространством в центре — навахи (рис. 8).

Это лучший способ остановить миграцию людей, потерявших здесь жилище и еще не готовых к безоговорочному принятию «европейских» норм коммунальной жизни, но сохраняющих лучшие качества восточного воспитания в религиозно-общинных условиях обитания в сплоченной застройке махалля – навахи.

Высокая оценка таких форм общежития в городах Узбекистана по достоинству характеризует правильное отношение правительства к сложившимся традициям устойчивости, позитивности, социальному здоровью людей, живущих в режиме «общинного» контакта [15, 16].

То есть имеется позитивный пример организации малоэтажной ковровой застройки (после землетрясений в Ашхабаде и Ташкенте), не разрушающей при воссоздании комплексов махалля социально-психологический климат восточной жизни.

Как метод возвращения к традициям обитания, дополненным необходимыми жизненными инфраструктурами (школы, торговля, социальные службы, мечеть, место работы), воссоздание кварталов минтаки на месте расчищенных от руин территорий при централизованной разработке унифицированных вариантов типологии усадеб навахи станет наиболее действенным средством как обновления жилой архитектуры, так и возвращения жизни поселениям в целом экономными, быстрыми темпами, не встречающими психологического противодействия со стороны аборигенов, оберегающих свои принципы идентичности, сохранения обычаев и патриархальной стабильности жизни.

Термин «аборигены» здесь используется в широком смысле слова как название коренных жителей определенного района, жизнь которых связана поколениями с местной культурой.

Восстановление территорий компактных навахи в принципе может опираться на усилия жителей наряду с действиями государства. Семейные усадь-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

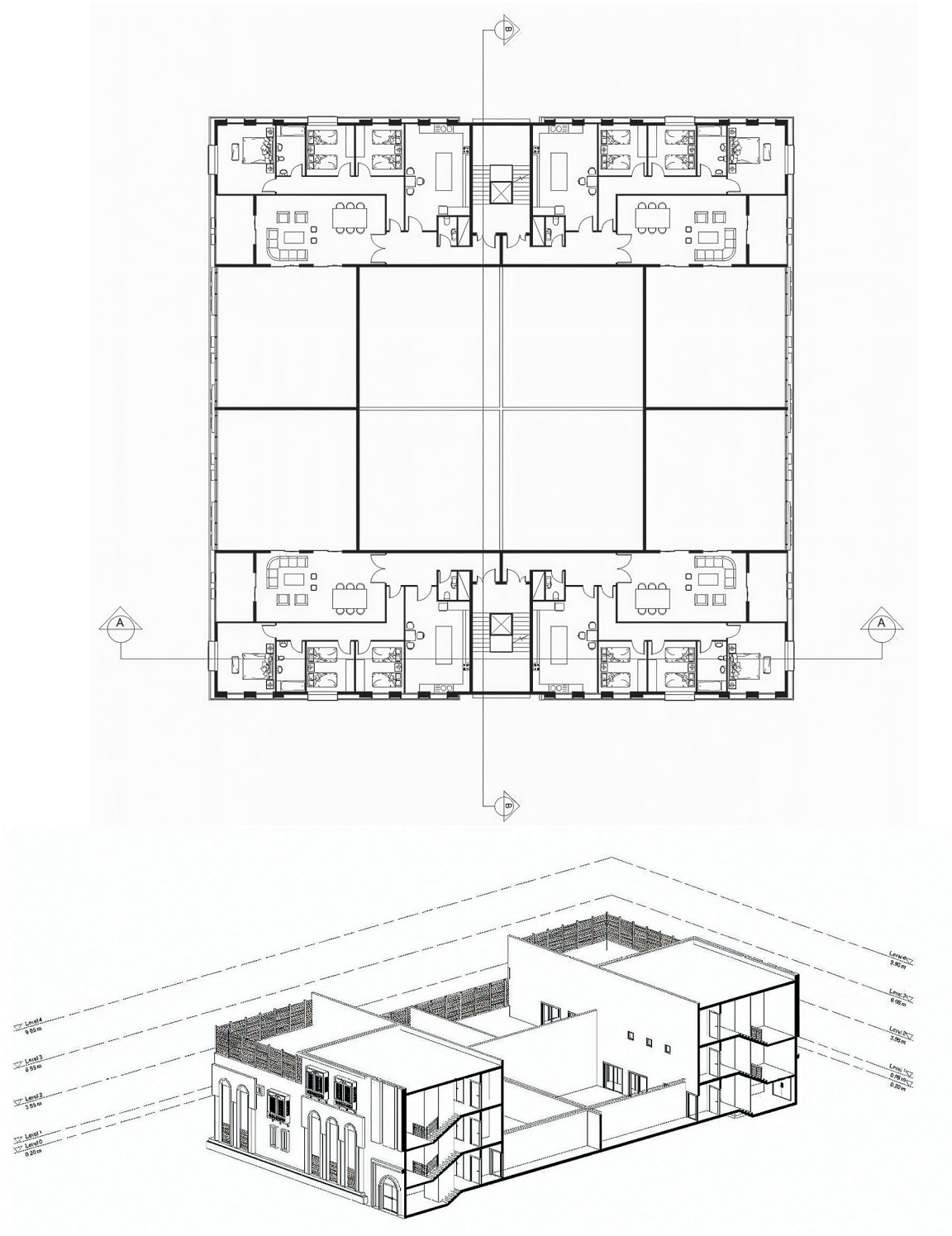


Рис. 6. Секция элитного многоэтажного дома с атриумными квартирами (предложение авторов)

Fig. 6. Section of an elite multi-storey building with atrium apartments (the authors' proposal)

бы могут расти в пределах выделенного участка, периметрально обстраивая его вокруг атриума. Стандартные участки для минтаки можно распределять в любом геометрическом контуре, вписанном в конфигурацию города.

Восстановление ковровой, фоновой застройки имеет исключительно важное значение для поддержания национального духа, общинных связей, воспитания молодого поколения в традициях; религиозная общность здесь проявляет себя как инструмент гуманитарного образования. Поэтому для восстановления исторической преемственности Пальмиры предлагается концепция, более широко охватывающая проблематику реосвоения городской структуры памятника и окрестных территорий.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

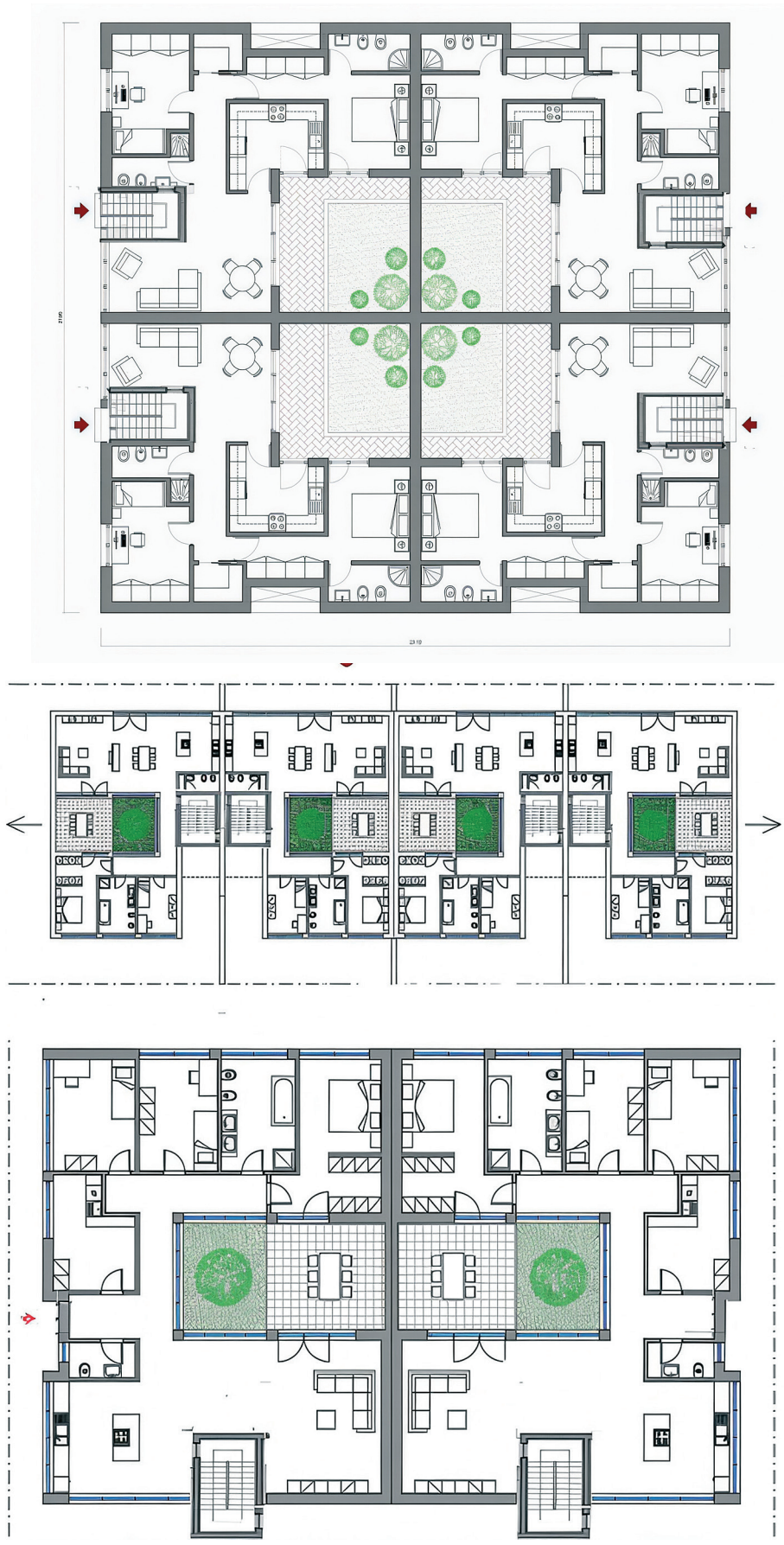


Рис. 7. Секция многоэтажного жилого дома для жителей среднего достатка

Fig. 7. Section of a multi-storey residential building for middle-class residents

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**



Рис. 8. Одно- и двухэтажные дома навахи для ковровой застройки

Fig. 8. One- and two-storey Navajo houses for carpet construction

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



Рис. 9. Расположение памятников архитектуры Пальмиры в массе жилой застройки

Fig. 9. The location of Palmyra's architectural monuments in the mass of residential buildings

Возвращаясь к Пальмире, расширим диапазон реабилитационных мероприятий от освоения собственно выявленной территории памятника до создания вокруг нее зоны освоения пустыни в меру необходимости организации поселения расчетной численности населения при сельскохозяйственном комплексе за счет его орошения, обеспечения питьевой и хозяйственной водой жителей, переселяемых из разоренных городов приморского региона.

Ориентируясь на нормы расселения махалля, разработанные ТашЗНИИЭПом, 450 чел/га (приемлемые для ковровых поселений Сирии) квадратный в плане участок минтаки размером 800 × 800 м, т.е. 64 га, вместит 1600 навахи по 400 м^2, в котором хватит места для 12 800 чел. при жилой норме на человека 20 м^2, т.е. каждая навахи 20 × 20 м^2 рассчитана на семью в 8 человек. Это, разумеется, приблизительные расчеты, поскольку нормы на человека и общие размеры единицы минтаки могут быть приняты другими. Для конкретной планировки имеет смысл разработать универсальную формулу планировки проектируемой единицы минтаки, под которую будут рассчитываться остальные элементы поселения как для реконструкции, так и для новых районов.

Пальмира, как административный центр куста поселений, полагается размещаемой в границах исторического поселения смежно с памятниками архитектуры (рис. 9).

Таким образом, мы отказываемся от соблюдения сакральных норм музеефикации руин, включая их в систему жилых и социально-культурных объектов, предлагая к обсуждению такую форму смешанного сосуществования архитектурных памятников и городской застройки. Тадмор также должен быть включен в общую систему застройки со своей функциональной нагрузкой [17, 18].

Проблема жизнеобеспечения новообразований решается различными способами, известными современной практике борьбы с опустыниванием. В их числе приемы добычи и рационального использования воды, не истощающие местные грунтовые воды и поверхностные потоки.

Евфрат как река, питающая водой несколько стран, должен быть исключен как источник водопотребления под угрозой иссушения. Должен быть минимизирован водозабор из артезианских скважин. Нужно смириться с тем, что пресная вода приобретает высокую ценность.

Следует приступать к использованию методов извлечения воды из атмосферы, привлекая как сложившиеся в древности бытовые способы конденсации влаги, так и современные индустриальные системы.

Включением в будущем Сирийской пустыни как аккумулятора водных ресурсов в мировой системе можно рассчитывать на перемещение воды из сибирских рек или транспортировку, как было показано, айсбергов.

Параллельно должны быть разработаны приемы экономного расходования воды при земледелии, водообороте бытовых вод, специальные системы орошения и т. п.

Эти технические средства хозяйственной и культурной реновации центрального некогда района Сирии с превращением Пальмиры в столичный город соединят ее магистралями с ближними городами, обеспечив тем самым ее коммуникационные связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статьей впервые среди публикаций, посвященных разрушениям среды обитания Сирии, обращено внимание на программирование типологии сооружений: многоэтажных с сохранением стилистики атриумных домов Средиземноморья и рядовой «ковровой» застройки, преобладающей в городах типично феодальных традиций обитания, что требует особой осмотрительности в работах по реконструкции жилища, не нарушающих патриархальные обычаи быта, своеобразного восточного «домостроя».

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

В том и другом случаях именно в архитектурной типологии заложены возможности толерантного обновления застройки с включением в цивилизованную архитектурную среду (по мировым стандартам) традиционных форм, цвета, орнамента.

Этим, кстати, реализуется мягкий переход мало меняющихся в веках психологических стереотипов в осмыслении аборигенами жизненных ценностей цивилизованных норм бытия и в известной мере снимает напряженность этнических конфликтов, обусловленных столкновением разных культур.

В отношении перспектив Пальмиры как знамени экономических и культурных преобразований центральной части страны нужно, независимо от ожидания мира, создать сценарий возвращения Пальмиры в роли культурно-исторического феномена в канву современной цивилизации не только музейным экспонатом, а живой, обитаемой средой поселений, окруженных садами и полями.

Встроенные в кварталы жилых и общественных зданий руины храмов, театр, километровая колоннада с триумфальной аркой образуют замечательную визуальную композицию, реабилитирующую в глазах нового поколения недомыслие предшественников, зомбированных религиозными предрассудками, суевериями дремучего сознания.

Мир меняется, изменится и осознание культурных ценностей истории без религиозной нетерпимости и черной злобы невежества. Вспомним, с каким интересом воспринимаются пасторальные картины на фоне руин античности (рис. 3).

Реализация патриотически-гражданских аспектов программы реанимации сирийской архитектуры, включая спасение страны от обезвоживания, зависит от технически осуществимых сегодня мероприятий доставки воды к орошаемым территориям. Цивилизованный мир должен спасти Сирию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Симонов В*. Пророчества Нострадамуса: от прошлого к 2012 году. М. : ЭКСМО, 2009. 432 с.

2. *Glennie K.W.* Desert Sedimentary Environments // Development in Sedimentology. Vol. 14. Elsevier : Amsterdam, 1970.

3. *Hillers D.R., Cussini E*. Palmyrene aramaic texts. Baltimore ; London : The Johns Hopkins University Press, 1996. 458 p.

4. *Шлюмберже Д.* Эллинизированный Восток. Греческое искусство и его наследие в несредиземноморской Азии. М. : Искусство, 1985. 208 с.

5. *AlAsaad Sh.* The Archaeological Site of Palmyra before and after the War in Syria // Археология евразийских степей. 2021. № 3. С. 298–306. DOI: 10.24852/2587-6112.2021.3.298.306. EDN BWFIKO.

6. *Альсулейман М.И.* Пространственное представление о разрушенных городах Сирии // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. № 4. С. 497–503. DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-4-497-503. EDN MKVODI.

7. *Топпер У*. Великий обман. Выдуманная история Европы. СПб. : Нева, 2004. EDN QOTECJ.

8. *Мусурманкулов Ф.У.* Махалля — важный субъект самоуправления граждан // Молодой ученый. 2013. № 7. С. 351–353. EDN OSIMSA.

9. *Азизханов А.Т., Ефимова А.П.* Теория и практика строительства демократического общества в Узбекистане. Национальный университет Узбекистана, 2005.

10. *Юлдашева Р.К.* Структура махалли и ее роль в жилой застройке исторических городов Узбекистана // Проблемы современной науки и образования. 2022. № 1 (170). С. 121–124. EDN RQYEKL.

11. *Ardalan N.* The sense of Unity: the Sufi Tradition in Persian Architecture. Chicago : The University of Chicago Press, 1973.

12. *Ноткин И.И.* Архитектурно-пространственное формообразование исторически сложившихся городов Узбекистана : дис… д-ра архитектуры. Ташкент, 1980. Т. 1. 418 с.

13. *Аасем А., Ткачев В.Н.* Реабилитация среды обитания современных городов Сирии // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 11. С. 1735–1745. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1735-1745

14. *Ткачев В.Н., Сарвут Т.О.* Опыт трансляции механизма теории фракталов на принципы освоения среды обитания Сибири и Заполярья // Архитектура и строительство России. 2019. № 2 (230). С. 48–57. EDN GCYBIO.

15. *Халиль И.* Типологические особенности объемно-планировочной структуры малоэтажных жилых зданий и сооружений Сирии // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 4 (45). С. 214–224. EDN YOBKBN.

16. *Яргина З.Н.* Эстетика города. М. : Стройиздат, 1991. 366 с.

17. *Гутнов А.Э.* Эволюция градостроительства. М. : Стройиздат, 1984. 256 с.

18. *Косицкий Я.В.* Архитектурно-планировочное развитие городов. М. : Архитектура-С, 2005. 648 с.

Поступила в редакцию 2 сентября 2025 г.
Принята в доработанном виде 8 сентября 2025 г.
Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

Об авторах: **Аммар Аасем** — аспирант кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; asemamar95@gmail.com;

Валентин Никитович Ткачев — доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Smirnov V. *The Prophecies of Nostradamus. From the past to 2012.* Moscow, EKSMO, 2010; 432. (rus.).

2. Glennie K.W. Desert Sedimentary Environments. *Development in Sedimentology. Vol. 14*. Elsevier, Amsterdam, 1970.

3. Hillers D.R., Cussini E. *Palmyrene aramaic texts*. Baltimore ; London, The Johns Hopkins University Press, 1996; 458.

4. Schlumberger D. *The Hellenized East. Greek Art and its heritage in Non-Mediterranean Asia*. Moscow, Art, 1985; 208. (rus.).

5. AlAsaad Sh. The Archaeological Site of Palmyra before and after the War in Syria. *Archaeology of the Eurasian Steppes*. 2021; 3:298-306. DOI: 10.24852/2587-6112.2021.3.298.306. EDN BWFIKO. (rus.).

6. Alsuleiman M.I. Spatial representation of the destroyed cities of Syria. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2019; 29(4):497-503. DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-4-497-503. EDN MKVODI .(rus.).

7. Topper W. *The Great deception. The fictional history of Europe*. St. Petersburg, Neva, 2004. EDN QOTECJ. (rus.).

8. Musurmankulov F.U. Mahalla — an important subject of citizens' self-government. *Young Scientist*. 2013; 7:351-353. EDN OSIMSA. (rus.).

9. Azizkhanov A.T., Efimova A.P. *Theory and practice of building a democratic society in Uzbekistan*. National University of Uzbekistan, 2005. (rus.).

10. Yuldasheva R.K. The structure of the mahalla and its role in residential development historical cities of Uzbekistan. *Problems of Modern Science and Education*. 2022; 1(170):121-124. EDN RQYEKL. (rus.).

11. Ardalan N. *The sense of Unity: the Sufi Tradition in Persian Architecture*. Chicago, The University of Chicago Press, 1973.

12. Notkin I.I. *Architectural and spatial shaping of historically formed cities of Uzbekistan : dis… doctor of architecture*. Tashkent, 1980; 1:418. (rus.).

13. Aasem A., Tkachev V.N. Rehabilitation of the habitat of modern cities in Syria. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1735-1745. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1735-1745(rus.).

14. Tkachev V.N., Sarvut T.O. Experience of translation of the mechanism of the theory of fractals to the principles of the development of the environment of the habitation of Siberia and Polarians. *Architecture and Construction of Russia.* 2019; 2(230):48-57. EDN GCYBIO. (rus.).

15. Khalil I. Typological features of space-planning low rise structure and facilities in Syria. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 4(45): 214-224. EDN YOBKBN. (rus.).

16. Yargina Z.N. *Aesthetics of the city*. Moscow, Stroyizdat, 1991; 366. (rus.).

17. Gutnov A.E. *The evolution of urban planning*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 256. (rus.).

18. Kositsky Ya.V. *Architectural and planning development of cities*. Moscow, Architecture-S, 2005; 648. (rus.).

Received September 2, 2025.
Adopted in revised form on September 8, 2025.
Approved for publication on September 24, 2025.

Bionotes: **Ammar Aasem** — postgraduate student of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; asemamar95@gmail.com;

Valentin N. Tkachev — Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 2.1.1
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1666-1678

Соединение профилированного настила с прогонами покрытия на высокопрочных болтах

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из ключевых задач включения в совместную работу профилированного настила с прогонами покрытия и стропильными фермами является создание надежного и жесткого соединения между ними. Стандартные крепления, применяемые на практике, демонстрируют недостаточную прочность в зоне отверстий, что ограничивает возможность включения настила в силовую схему покрытия. В связи с этим актуальна задача разработки конструктивных решений, повышающих несущую способность и жесткость узлов крепления тонкостенных элементов к прогонам покрытия.

Материалы и методы. Предложена и проанализирована конструкция болтового соединения, усиленного композитными элементами на основе углеродного волокна. Проведен теоретический расчет контактных напряжений в зоне шайбы, определены условия наступления смятия листа и дана оценка эффективности внешнего усиления. Экспериментальная часть включала испытания болтовых соединений профилированного настила Н153 из стали 08ПС толщиной 1,5 мм с болтами М12 как без усиления, так и с применением накладок из углеродной ткани, пропитанной эпоксидным клеем.

Результаты. Теоретически обосновано снижение контактных напряжений в соединении при усилении углеродным волокном путем увеличения эквивалентной жесткости зоны болтового соединения. Экспериментально установлено, что усиленные соединения демонстрируют увеличение несущей способности в упругой стадии работы до 40 % по сравнению с не усиленными.

Выводы. Применение внешнего усиления из углеродного волокна позволяет существенно повысить надежность и жесткость болтового соединения тонкостенного профилированного настила. Предложенное решение обеспечивает работоспособность соединения при эксплуатационных усилиях, препятствует развитию локальных разрушений и способствует включению настила в совместную работу с несущими элементами покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация конструкций, профилированный настил, соединение профилированного настила, болтовое соединение на высокопрочных болтах тонкостенных листов, смятие, углеродное волокно, композитные материалы, усиление углеродным волокном стальных листов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Бажин Г.М.* Соединение профилированного настила с прогонами покрытия на высокопрочных болтах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1666–1678. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1666-1678

Автор, ответственный за переписку: Григорий Михайлович Бажин, gbajin@mail.ru.

Connection of profiled decking with roof purlins using high-strength bolts

Grigoriy M. Bazhin
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the key challenges in integrating profiled decking with roof purlins and truss systems is creating a reliable, stiff connection between them. Conventional fasteners used in practice often exhibit insufficient strength around the hole edges, limiting the decking's contribution to the overall load-bearing system. Therefore, it is important to develop design solutions that enhance the load capacity and rigidity of the joints that attach thin-walled elements to roof purlins.

Materials and methods. This study proposes and analyzes a bolted connection reinforced with carbon-fibre composite elements. A theoretical calculation of contact stresses in the washer area was carried out, conditions leading to sheet crushing were identified, and the effectiveness of the external reinforcement was assessed. Experimentally, bolted connections

© Г.М. Бажин, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

in H153 profiled decking (08ps steel, 1.5 mm thick) with M12 bolts were tested both without reinforcement and with overlays of epoxy-impregnated carbon fabric.
Results. Theoretically, reinforcement with carbon fibre was shown to reduce contact stresses in the connection by increasing the equivalent stiffness of the bolted joint zone. Experimentally, the reinforced connections demonstrated up to a 40 % increase in load capacity within the elastic range compared to non-reinforced joints.
Conclusions. Applying external carbon-fibre reinforcement significantly improves the reliability and stiffness of bolted connections in thin-walled profiled decking. The proposed solution ensures the joint can withstand operational loads, prevents the onset of local failures, and enables the decking to act compositely with the roof's primary load-bearing elements.

KEYWORDS: structural optimization, profiled steel sheeting, bolted connection, high-strength bolts, thin-walled steel sheets, bearing failure, carbon fibre, composite reinforcement, external strengthening of steel sheets

FOR CITATION: Bazhin G.M. Connection of profiled decking with roof purlins using high-strength bolts. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1666-1678. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1666-1678 (rus.).

Corresponding author: Grigoriy M. Bazhin, gbajin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений повышения эффективности металлических конструкций покрытий промышленных и гражданских зданий является включение ограждающих элементов, в частности профилированного настила, в совместную работу с элементами каркаса. Профнастил широко применяется в качестве несъемной опалубки для монолитных перекрытий или ограждающего элемента покрытия в кровлях благодаря высокому отношению жесткости к массе. Однако в большинстве практических решений его функции ограничиваются восприятием распределенной вертикальной нагрузки, например, от «пирога» кровли, без учета его потенциальной способности перераспределять усилия между прогонами и стропильными фермами.

Профнастил может использоваться для повышения общей пространственной жесткости и устойчивости здания, включаясь в совместную работу с элементами стального каркаса (например, работая как диафрагма жесткости покрытия или в составе распределительных горизонтальных связей). Для реализации совместной работы настила и каркаса необходимо надежное жесткое сопряжение листа с элементами каркаса (прогоном, стропильной фермой). В настоящее время крепление профнастила к стальным балкам или прогонам, как правило, осуществляется с помощью болтовых соединений из стандартных метизов согласно СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012 (правила устройства болтовых соединений)[1]. Недостаток таких традиционных узлов заключается в их низкой несущей способности по смятию тонкостенного листа под давлением шайбы при затяжке болта. Если использовать высокопрочный болт, то он, затянутый с необходимым моментом, может вдавливать тонкий стальной лист, вызывая локальное пластическое деформирование (смятие) в зоне отверстия и гофра и, как следствие, ослабляя или даже выводя из работы соединение. Таким образом, актуальна задача разработки узлов крепления профнастила, обеспечивающих жесткое сопряжение без местного разрушения листа.

За последние десятилетия предложен ряд решений, направленных на повышение надежности болтовых соединений тонколистовых элементов. Известны, к примеру, конструкции с применением специальных закрепляемых вставок и шайб сложной формы, предотвращающих смятие и сдвиг (конические втулки, рифленые шайбы и т.п.) [1–4]; либо использование модифицированного крепежа (гайки с выступами, внедряющимися в тонкий лист при затяжке) [5–7]. Подобные решения улучшают работу соединения, но требуют изготовления специальных деталей и технологических операций, усложняя монтаж.

Другой подход основан на использовании композиционных материалов для усиления узла [8–10]. Так, в патенте RU 2476651 C1 [11] предложено соединение профнастила с балкой с помощью приклеенных полос композитного материала без помощи болтов. Достоинство композитного усиления — высокая прочность и жесткость при малом добавочном весе; в частности, углеродные волокна обладают модулем упругости, превышающим модуль стали, что позволяет эффективно перераспределять нагрузку и снижать деформации узла. Однако полное исключение механического крепежа требует сложной технологии и контроля качества клеевых соединений.

Перспективное компромиссное решение — сочетание традиционного болтового крепления с локальным усилением зоны крепления композиционными материалами [12, 13].

Объект исследования в настоящей работе — болтовое соединение, в котором с двух сторон профилированного листа в месте примыкания к несущей балке приклеиваются полосы углеродной ткани на эпоксидном клее, после чего через совместные отверстия устанавливается высокопрочный болт с шайбами. Такое соединение дает возможность снизить деформативность листа при затяжке болтом и предотвратить его смятие, сохраняя требуемую жесткость узла (рис. 1).

Для практической реализации данного технического решения необходимо экспериментальное и аналитическое обоснование его эффективности.

[1] СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012. Строительные конструкции металлические. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М. : Национальное объединение строителей, 2012. 56 с.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

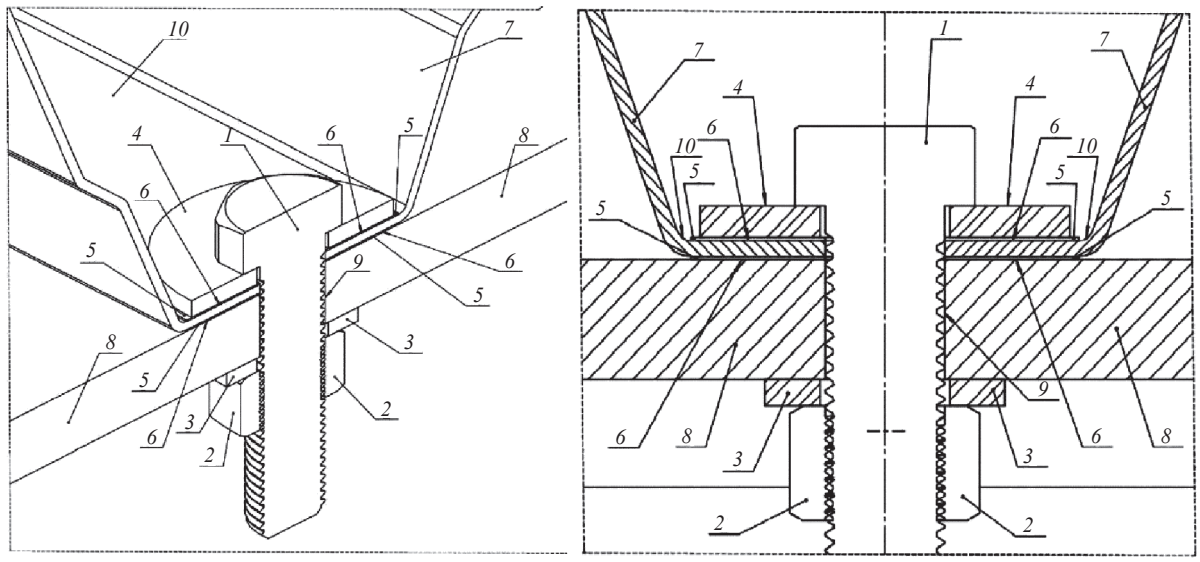


Рис. 1. Болтовое соединение профилированного настила на высокопрочных болтах [5]: *1* — высокопрочный болт; *2* — гайка; *3* — шайба; *4* — шайба усиленная; *5* — полоса углеродной ткани; *6* — слой эпоксидного клея; *7* — металлический профильный лист; *8* — балка конструкции; *9* — отверстие; *10* — паз

Fig. 1. Bolted connection of profiled sheeting using high-strength bolts [5]: *1* — high-strength bolt; *2* — nut; *3* — washer; *4* — reinforced washer; *5* — carbon fibre strip; *6* — layer of epoxy adhesive; *7* — profiled steel sheet; *8* — structural beam; *9* — hole; *10* — groove

С этой целью были проведены ряд теоретических исследований, численных и лабораторных экспериментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования

Модель болтового соединения профнастила может быть представлена тонкой стальной пластиной (полкой гофрированного листа), прижатой к опорной балке через шайбу. При затяжке болта в области контакта возникает распределенное давление, приводящее к возникновению контактных напряжений, концентрирующихся вокруг отверстия. Распределение напряжений можно описать как радиально убывающее от центра отверстия: максимальное сжатие приходится на зону под шайбой непосредственно около болта и снижается с увеличением радиуса. Критерием смятия профнастила в узле является достижение предела текучести материала листа в области контакта под шайбой. При превышении критического давления происходит пластическая деформация в области затяжки болтом (отпечаток) в листе и необратимое ослабление соединения.

С целью оценки допускаемой затяжки можно сравнить усилие предварительного натяжения болта N с расчетным сопротивлением листа на смятие:

$$N \le 1{,}35 \cdot R_u \pi d_ш t_н, \qquad (1)$$

где N — допустимое усилие затяжки; R_u — расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению, МПа (табл. 5 [2]); $d_ш$ — наружный диаметр шайбы, мм; $t_н$ — толщина настила.

При отсутствии усиления площадь контакта смятия $A_{см} = \pi d_ш t_н$ невелика и зачастую критерий смятия тонкого листа оказывается определяющим — болтовое соединение теряет жесткость уже при усилиях затяжки, необходимых для обеспечения несдвигаемости соединения.

Так, подставляя значения в выражение (1) при толщине профнастила $t_н$ = 1,5 мм и диаметре шайбы 24 мм, максимально допустимое усилие затяжки для стали 08ПС будет:

$$N_{см} = 1{,}35 \cdot 360 \cdot 3{,}14 \cdot 24 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 17{,}6 \text{ кН}.$$

При необходимом усилии затяжки 70 кН это в 4 раза меньше требуемого.

Для повышения несущей способности соединения используется внешний способ усиления — приклеивание углеродной однонаправленной ткани CWrap Fabric 530/300 (Toray T700SC-24K)[2] в зону отверстия с двух сторон листа (рис. 1). Такая ткань обладает прочностью на разрыв свыше 4900 МПа и модулем упругости более 250 ГПа при толщине одного слоя ~0,293 мм.

Основным эффектом внешнего усиления служит восприятие тканью растягивающих окружных усилий, возникающих в металле вокруг отверстия при действии затяжки болта. Углеродная ткань,

[2] СТО 2256-002–2011. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. Общие требования. Технология устройства. М. : ЗАО «Препрег-СКМ», 2012. 32 с.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

обладающая высоким модулем упругости и прочностью на растяжение, снижает концентрацию напряжений в зоне отверстия, препятствуя развитию пластических деформаций и преждевременному разрушению металла. Таким образом, ткань берет на себя часть окружных растягивающих усилий, перераспределяя их между металлическим листом и слоем усиления.

Дополнительный эффект усиления заключается в увеличении эквивалентной жесткости профилированного настила в зоне соединения. За счет этого уменьшаются локальные деформации в процессе затяжки болта, повышается сопротивляемость листа к локальному смятию и стабилизируется форма отверстия при эксплуатационных нагрузках.

Учитывая, что контактная нагрузка от шайбы распределяется частично в стали, частично в волокне, целесообразно применять суперпозиционную модель: полная несущая способность соединения представляется как сумма усилий, воспринимаемых металлом и углеродной тканью:

$$N_{max} = \sigma_{см}\pi d_{ш} t_{н} + \sigma_{угл} 2\pi r t_{угл}, \quad (2)$$

где $\sigma_{см}$, $\sigma_{угл}$ — допустимое напряжение смятия стали и углеволокна соответственно; r — радиус отверстия под болтом; $t_{угл}$ — толщина слоя углеродного волокна.

При усилении места затяжки тремя слоями углеродного волокна, толщине настила, равной 1,5 мм, и толщине слоя углеродного волокна $t_c = 3 \cdot 0{,}293 = 0{,}879$ мм, воспользовавшись выражением (2), получим максимально допустимое усилие затяжки, равное:

$$N_{max} = 113{,}7 \cdot 3{,}14 \cdot 24 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} + \\ + 2000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}879 \cdot 10^{-3} = 84{,}6 \text{ кН},$$

где радиус отверстия под болтом $r = d_{отв}/2 = 6{,}5$ мм, для болта М12.

Это удовлетворяет предварительному условию, где усилие затяжки болта принято 70 кН.

Таким образом, применение внешнего усиления профилированного настила углеродной тканью позволяет использовать в качестве соединения листа с прогонами покрытия болтовые соединения на высокопрочных болтах.

Численные исследования

Для оценки работы узла крепления профнастила к прогону выполнено моделирование фрагмента профлиста в ПК ANSYS Mechanical (рис. 2). Численные эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе исследовалась работа узла без усиления, состоявшего из двух болтокомплектов М12, прикрепляющих настил к пластине толщиной 4 мм. На границах каждой гайки заданы граничные условия, запрещающие углы поворотов и перемещения, а к шляпке болта приложена сила, равная 65 кН, в качестве усилия затяжки, к грани пластины прило-

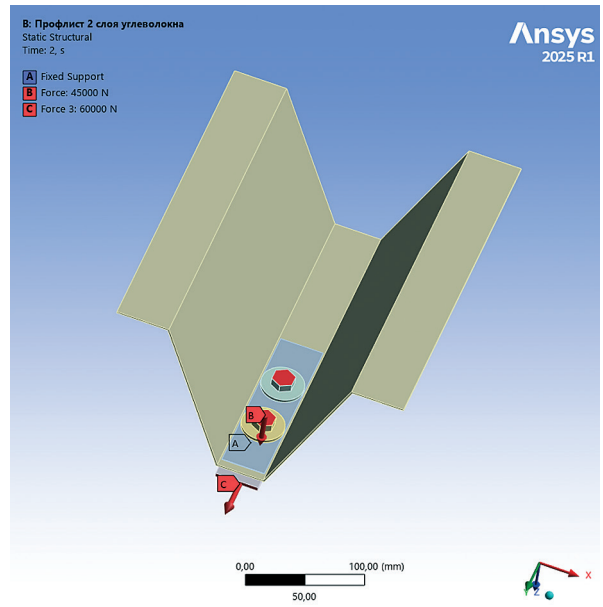


Рис. 2. Конечно-элементная модель образца испытаний фрагмента настила

Fig. 2. Finite element model of the test specimen of the decking fragment

жено растягивающее усилие 60 кН. Усилие затяжки и растягивающая сила включаются в работу поэтапно и с нарастанием усилия во времени.

Болт и шайбы моделировались объемными телами, контактное взаимодействие между элементами (лист – шайба, лист – пластина, шайба – болт и т.д.) задавалось с учетом трения (Frictional), с коэффициентом 0,2.

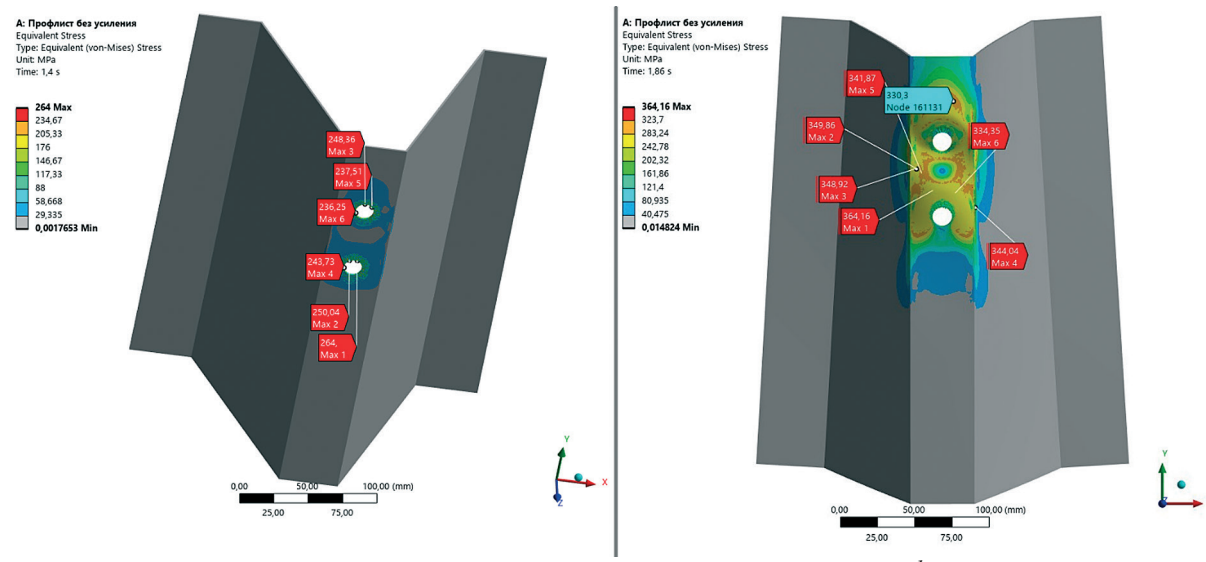
В результате численного анализа определены распределения напряжений в области затяжки профилированного листа (рис. 3), пластические деформации листа вокруг отверстия, а также прогнозируемые нагрузки начала пластического текучего состояния и разрушения (рис. 4).

Распределение напряжений в упругой стадии работы (рис. 3, *а*) в основном располагается вокруг области затяжки, максимальное напряжение составляет ~264 МПа, что соответствует пределу текучести испытуемой стали, равному 264,5 МПа. Данное напряжение достигается при растягивающей силе ~24 кН. В момент разрушения образца (рис. 3, *b*) максимальное напряжение составило ~364 МПа, эта зона расположилась между двумя отверстиями в области затяжки болтами. В момент разрушения растягивающее усилие составило ~51,6 кН.

Как видно из рис. 4, пластические деформации в листе возникают в основном в области отверстия, и разрушение происходит по границе отверстия в профлисте в направлении действия растягивающего усилия.

На втором этапе исследован образец фрагмента профилированного листа, усиленного с двух сторон углеродным волокном [5]. Для усиления было принято углеродное волокно CWrap FibArm

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**



a *b*

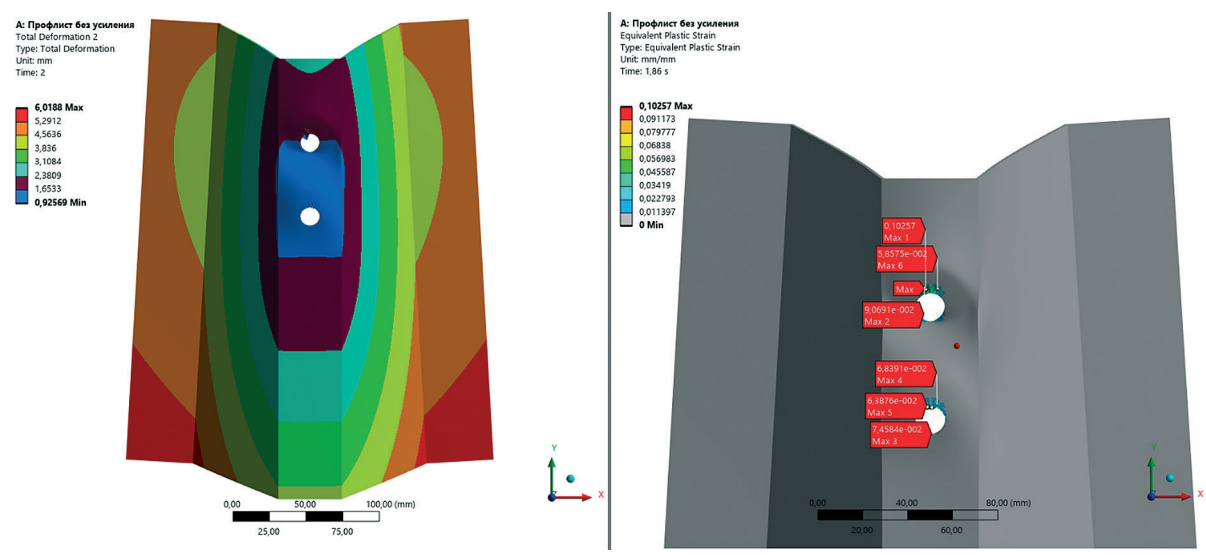
Рис. 3. Эквивалентные напряжения в фрагменте профнастила без усиления, МПа: *a* — в упругой стадии работы; *b* — в момент разрушения листа

Fig. 3. Equivalent stresses in the fragment of profiled sheeting without reinforcement, MPa: *a* — at the elastic stage of operation; *b* — at the moment of sheet failure

Tape 530/300 (волокно Toray T700SC), наклеенное в два слоя на профлист. Эпоксидный клей в модели не учитывался, соединение между углеродным волокном и профилированным листом выполнено контактными парами CONTA174 – TARGE170, остальные контакты заданы аналогично модели без усиления углеродным волокном. В случае с усиленным образцом первой зоной достижения предела упругой стадии работы оказалась граница сгиба профилированного настила (рис. 5).

При растягивающей силе, равной 39 кН, максимальные напряжения у грани перехода от условной полки фрагмента профлиста к его стенке составили ~270 МПа, на рис. 3, *b* видны области, где началось развитие пластических деформаций. При этом в зоне затяжки болтами напряжения не превышают ~255 МПа.

Предел текучести в зоне затяжки болтом был достигнут при растягивающей силе 42 кН (рис. 6, *a*). На рис. 6, *b* видно, что пластические деформации развились в области отверстий в профнастиле.

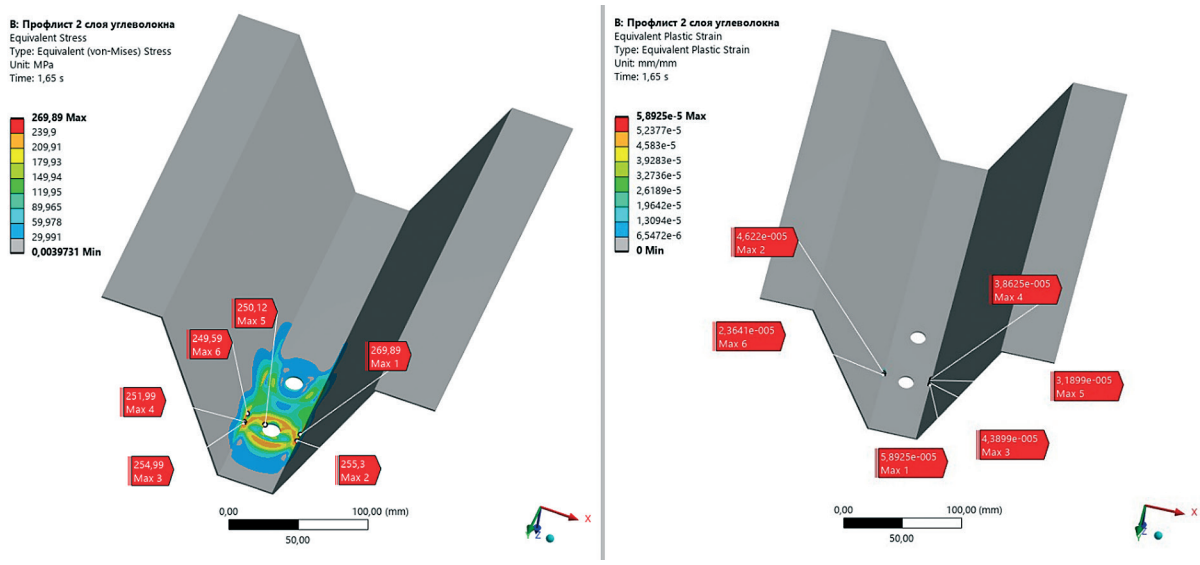


a *b*

Рис. 4. Деформации и пластические деформации в фрагменте профнастила без усиления: *a* — суммарные деформации в образце, мм; *b* — пластические деформации в момент разрушения образца

Fig. 4. Deformations and plastic deformations in the fragment of profiled sheeting without reinforcement: *a* — total deformations in the specimen, mm; *b* — plastic deformations at the moment of specimen failure

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



a *b*

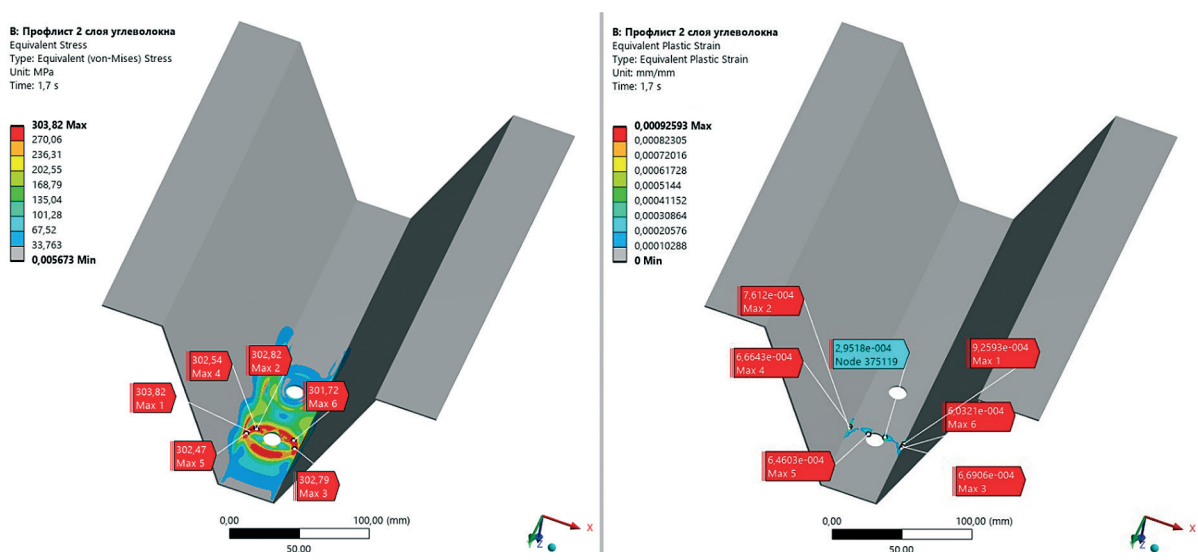
Рис. 5. Эквивалентные напряжения и пластические деформации в фрагменте усиленного профнастила на границе упругой стадии работы: *a* — эквивалентные напряжения, МПа; *b* — пластические деформации мм/мм

Fig. 5. Equivalent stresses and plastic deformations in the fragment of reinforced profiled sheeting at the boundary of the elastic stage of operation: *a* — equivalent stresses, MPa; *b* — plastic deformations, mm/mm

Разрушение усиленного образца произошло при растягивающем усилии, равном ~52,8 кН (рис. 7), что примерно соответствует границе разрушения не усиленного образца, которое произошло при растягивающей силе ~51,6 кН. Однако зоны упругой стадии работы существенно отличаются. Так, в не усиленном образце при растягивающей силе, равной 24 кН, в зоне затяжки болта уже был достигнут предел текучести для испытуемой стали 264 МПа. В усиленной зоне предел текучести наступил при растягивающей силе 42 кН, что на ~75 % выше, чем в образце без усиления. Упругая стадия работы в профнастиле была завершена при ~39 кН в зоне стыка условной полки и стенки профнастила (рис. 5).

Экспериментальные исследования

Для оценки прочности и деформативности болтового соединения профилированного настила на высокопрочных болтах выполнены лабораторные испытания, состоящие из трех последовательных серий, различающихся условиями закрепления и наличием усиления зоны соединения.



a *b*

Рис. 6. Эквивалентные напряжения и пластические деформации в фрагменте усиленного профнастила на границе упругой стадии работы в области отверстий: *a* — эквивалентные напряжения, МПа; *b* — пластические деформации мм/мм

Fig. 6. Equivalent stresses and plastic deformations in the fragment of reinforced profiled sheeting at the boundary of the elastic stage of operation in the area of the openings: *a* — equivalent stresses, MPa; *b* — plastic deformations, mm/mm

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

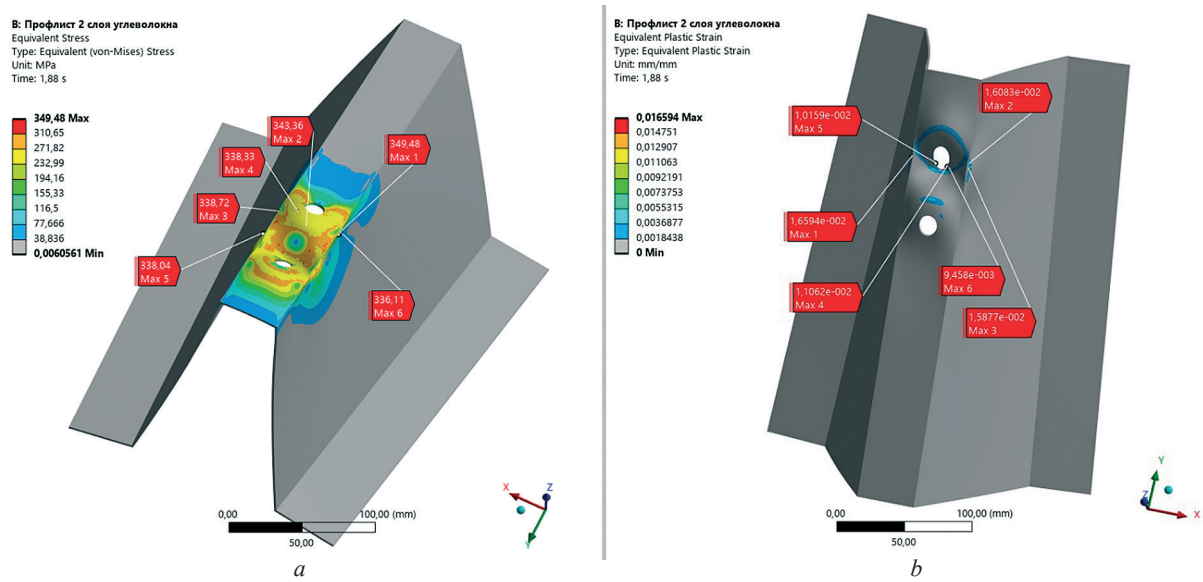


Рис. 7. Эквивалентные напряжения и пластические деформации в фрагменте усиленного профнастила в момент разрушения листа: *a* — эквивалентные напряжения, МПа; *b* — пластические деформации мм/мм

Fig. 7. Equivalent stresses and plastic deformations in the fragment of reinforced profiled sheeting at the moment of sheet failure: *a* — equivalent stresses, MPa; *b* — plastic deformations, mm/mm

В первой серии испытаний исследовались контрольные образцы без усиления (рис. 8, 9). Во второй — образцы с внешним усилением: в зоне установки болтов приклеивалась углеродная ткань с обеих сторон листа. В третьей серии реализованы условия, приближенные к реальной работе настила в составе покрытия: была ограничена возможность потери устойчивости стенок гофра в поперечном направлении.

Нагрузка прикладывалась перпендикулярно плоскости листа в условиях одноосного растяжения, имитирующего отрыв настила от несущего элемента. Испытания проводились на гидравлической разрывной машине с регистрацией силы и перемещений. Фиксировались как значения разрушающей нагрузки, так и характер разрушения.

Испытывались фрагменты профилированного настила Н153 толщиной 1,5 мм, размерами 300 × 284 мм.



Рис. 8. Образцы без усиления в зоне установки болтокомплектов

Fig. 8. Specimens without reinforcement in the area of bolt assembly installation



Рис. 9. Образец без усиления в испытательной машине

Fig. 9. Unreinforced specimen in the testing machine

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Табл. 1. Результаты испытания образцов без усиления

Table 1. Test results of specimens without reinforcement

Номер образца Specimen Number	Маркировка образца Specimen marking	Максимальная нагрузка до разрушения, кН Maximum Load to Failure	Характер разрушения Failure mode
1	1	53,2	Смятие и разрыв по отверстию; потеря устойчивости стенок гофры Crushing and tearing around the hole; buckling of corrugation walls
2	2	51,4	
3	3	50,5	

На продольной оси каждого образца выполнялось два отверстия диаметром 13 мм под болты М12, расположенные с шагом 50 мм. Болтовое соединение включало болты М12 × 1,25 (ГОСТ Р ИСО 4017–2013, класс прочности 10,9), гайки (ГОСТ ISO 4032–2014), плоские шайбы А.12 (ГОСТ 11371–78) и усиленные шайбы Ø13 (DIN 9021). Затяжка болтов выполнялась с моментом 144 Нм, соответствующим усилию затяжки 70 кН, результаты испытания приведены в табл. 1 и на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что граница упругой работы узла соединения характеризуется нагрузкой 20–28 кН. В дальнейшем наблюдается нелинейных характер деформирования образцов и разрушение профилированного настила в зоне установки болтокомплекта (рис. 11), ближайшего к области передачи растягивающего усилия.

В серии с усилением использовалась углеродная ткань FibArm Tape 530/300 (волокно Toray T700SC), пропитанная эпоксидным связующим FibArm Resin 530+. Усиление осуществлялось четырьмя слоями ткани — по два с каждой стороны листа (рис. 12, 13). Расчетная толщина одного слоя составляла 0,293 мм. Перед испытаниями усиленные образцы выдерживались в течение пяти суток при температуре выше 20 °С в соответствии с тре-

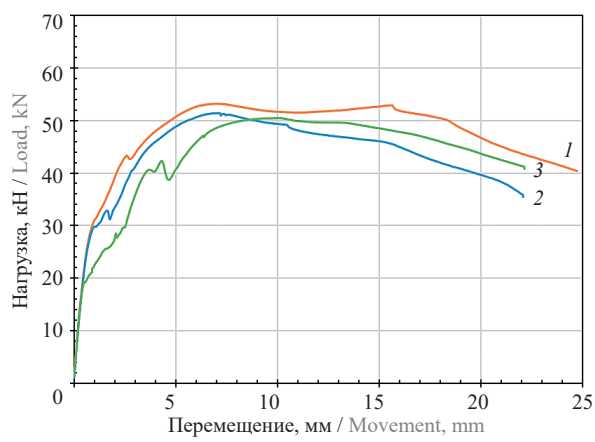


Рис. 10. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для образцов без усиления

Fig. 10. Load – displacement diagram for specimens without reinforcement

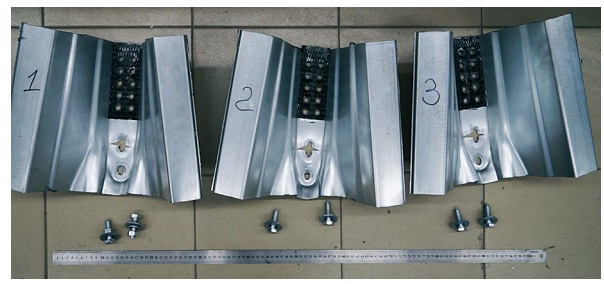


Рис. 11. Характер разрушения образцов

Fig. 11. Failure mode of the specimen



Рис. 12. Образцы с усилением в зоне установки болтокомплектов

Fig. 12. Specimens with reinforcement in the area of bolt assembly installation

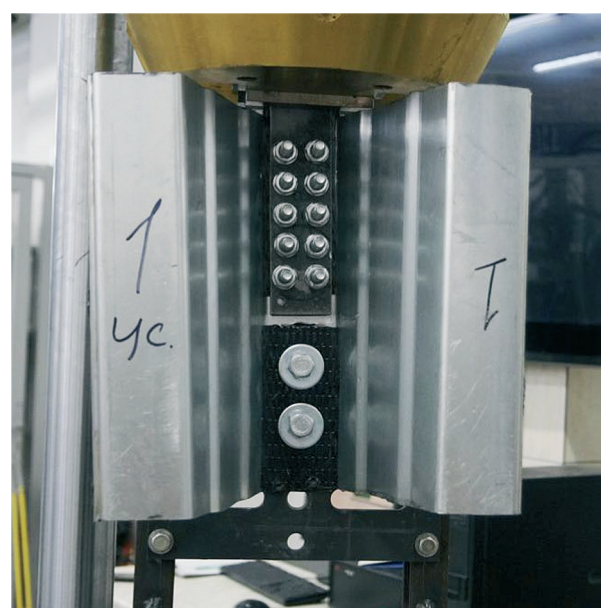


Рис. 13. Образец с усилением в испытательной машине

Fig. 13. Reinforced specimen in the testing machine

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

Табл. 2. Результаты испытаний усиленных образцов

Table 2. Test results of reinforced specimens

Номер образца Specimen Number	Маркировка образца Specimen marking	Максимальная нагрузка до разрушения, кН Maximum Load to Failure	Характер разрушения Failure mode
1	1	58,3	Смятие; потеря устойчивости стенок гофры Crushing; buckling of corrugation walls
2	2	56,8	Смятие и разрыв по отверстию; потеря устойчивости стенок гофры Crushing and tearing around the hole; buckling of corrugation walls
3	3	55,9	Смятие и разрыв по отверстию; потеря устойчивости стенок гофры Crushing and tearing around the hole; buckling of corrugation walls
4	4	54,4	Смятие; потеря устойчивости стенок гофры Crushing and tearing around the hole; buckling of corrugation walls
5	5	60,3	Смятие и разрыв по отверстию; частичная потеря устойчивости стенок гофры Crushing and tearing around the hole; partial buckling of corrugation walls

бованиями технического паспорта и СТО 2256-002–2011, результаты испытания приведены в табл. 2 и на рис. 14.

В контрольной серии (без усиления) среднее значение разрушающей нагрузки составило 51,7 кН. Тип разрушения включал локальное смятие листа в зоне отверстий и потерю устойчивости стенок гофра. Во второй серии (с усилением) наблюдалось увеличение предельной нагрузки до среднего значения 56,4 кН, что соответствует приросту 9 % по сравнению с не усиленными соединениями. При этом отмечался более упругий характер деформирования, особенно на начальном этапе нагружения (рис. 15).

Третья серия показала наилучший результат: разрушение наступило при 60,3 кН, что на 17 % превышает результат контрольной серии. Указанные образцы были модифицированы дополнительными элементами (рис. 16), ограничивающими деформации стенок гофра из плоскости, что позволило смоделировать условия жесткого прикрепления настила в составе покрытия.

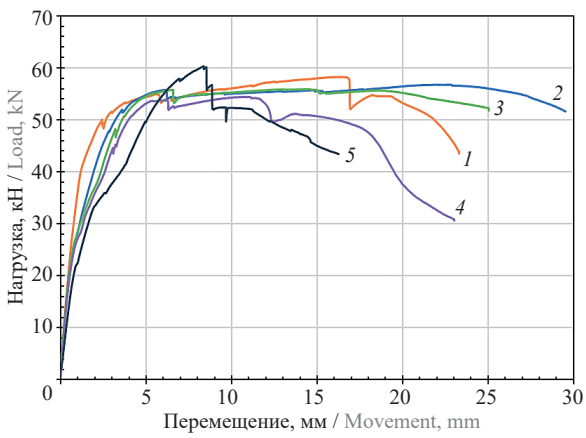


Рис. 14. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для образцов с усилением

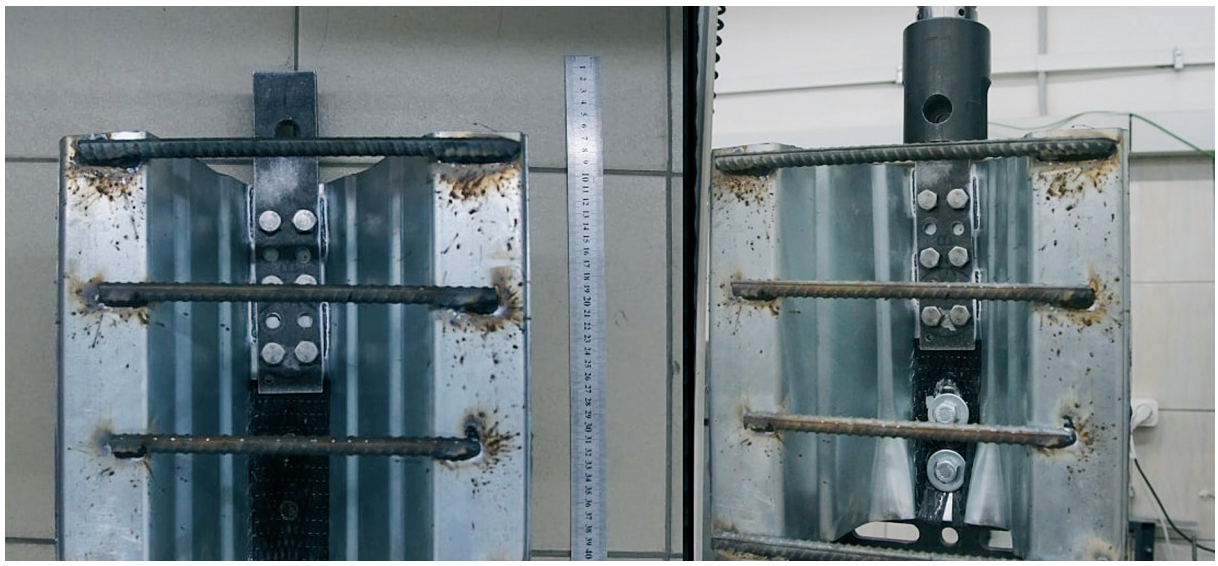
Fig. 14. Load – displacement diagram for specimens with reinforcement



Рис. 15. Характер разрушения усиленных образцов

Fig. 15. Failure mode of the reinforced specimens

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



a *b*

Рис. 16. Модифицированный образец с дополнительными элементами: *a* — образец до испытания; *b* — характер разрушения образца

Fig. 16. Modified specimen with additional elements: *a* — specimen before testing; *b* — failure mode of the specimen

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного численного моделирования и серии экспериментальных испытаний получены данные, подтверждающие эффективность применения наружного углеродного усиления в болтовых соединениях профилированного настила с прогонами покрытия. Полученные численные и экспериментальные сведения демонстрируют повышение прочности и жесткости соединения при использовании предлагаемого конструктивного решения [11] по сравнению с традиционным узлом без усиления.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния узла показал, что при внешнем усилении профилированного настила углеволокном несущая способность соединения возрастает. В частности, максимальная расчетная нагрузка, воспринимаемая усиленным соединением в упругой стадии, возросла до 39 кН, что примерно на 38 % превышает аналогичный показатель для не усиленного варианта (24 кН). Распределение напряжений в модели свидетельствует о разгрузке зоны вокруг отверстия под болт за счет передачи части усилий на углеволоконный элемент, что снижает концентрацию напряжений в тонколистовом настиле.

Аналогичные результаты получены при проведении экспериментальных испытаний образцов. Усиленные углеродным материалом соединения выдержали более высокие нагрузки по сравнению с контрольными образцами без усиления. Среднее предельное значение нагрузки для усиленного варианта при упругой стадии работы составило 40–45 кН, тогда как для обычного соединения этот показатель 20–28 кН. Таким образом, прирост прочности при использовании наружного углеродного армирования составил порядка 37 % по сравнению с базовым (не усиленным) соединением, что подтверждает высокую эффективность предложенного метода.

Помимо увеличения прочности отмечается заметное повышение жесткости соединения при использовании внешнего усиления. На графиках зависимости «нагрузка – перемещение» (рис. 14) кривые для усиленных соединений характеризуются более крутым начальным участком, что свидетельствует о возрастании начальной жесткости узла. Кроме того, усиленные образцы демонстрировали меньшую деформативность вплоть до наступления разрушения: до предельных режимов нагружения их соединение сохраняло геометрическую стабильность, тогда как в не усиленных узлах заметные локальные повреждения появлялись уже на ранних этапах нагружения.

Внешнее углеродное армирование повлияло и на характер работы, и на разрушения узла. В не усиленных образцах при достижении предельного состояния наблюдалось развитие значительных пластических деформаций и повреждений профнастила в зоне отверстия под болт (локальные изгибы, вмятины и надрывы металла). Напротив, у усиленных соединений до достижения предельной нагрузки деформации настила в области отверстия были менее выражены, так как часть нагрузки воспринималась наклеенным углеволокном. При этом надо отметить, что разрушение усиленных и не усиленных образцов происходило при ~50 кН, что было зафиксировано как в численных экспериментах, так и подтверждено лабораторными испытаниями.

Сопоставление результатов численного моделирования с данными эксперимента показывает их

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

хорошее совпадение. Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями предельной нагрузки не превышают ~5 %. Таким образом, разработанная численная модель адекватно описывает работу болтового соединения с углеродным усилением и может применяться для оценки напряженно-деформируемого состояния подобных конструктивных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило, что использование наружного углеродного усиления позволяет существенно повысить прочность и жесткость болтового соединения профилированного настила с прогонами, что также подтверждается в результатах исследований многих авторов, изучающих усиление композиционными материалами стальных конструкций и тонких стальных листов [14–19]. Предложенное конструктивное решение [11] продемонстрировало высокую эффективность: усиление обеспечило значительный рост несущей способности соединения (порядка 40 %) и заметное уменьшение его деформативности. Эти результаты особенно важны для практики усиления существующих строительных конструкций, так как применение композитных материалов дает возможность повышать надежность и долговечность узлов без существенного увеличения массы конструкции и без сложных монтажных операций.

К преимуществам предлагаемого метода относятся его технологичность и универсальность. Углепластиковое внешнее усиление может быть применено на уже эксплуатируемых конструкциях для повышения их ресурса, а также учтено при проектировании новых зданий с целью снижения материалоемкости при сохранении требуемой прочности узлов. В отличие от традиционных методов (таких как установка дополнительных стальных накладок или увеличение толщины металла), использование композитных материалов практически не увеличивает нагрузку на несущие элементы и не подвержено коррозии. Кроме того, внешнее армирование на основе углеволокна отличается гибкостью в применении и может быть адаптировано под различные формы и размеры узловых элементов без необходимости их существенной доработки.

В то же время полученные результаты являются этапом комплексного исследования и требуют дальнейшего развития. Необходимо провести дополнительные исследования для оценки работоспособности и долговечности усиленных соединений при длительной эксплуатации. В частности, представляют интерес испытания на усталость при циклических нагрузках, а также изучение поведения усиленных узлов при воздействии различных температурно-влажностных условий и других факторов внешней среды. Целесообразно также проверить эффективность предложенного решения для различных типов профилированного настила и схем нагружения (например, при динамических или сейсмических воздействиях). Перечисленные направления исследований дадут возможность более полно оценить область применимости и оптимизировать разработанную методику усиления.

Таким образом, использование углеродного внешнего усиления в узлах крепления тонколистовых настилов продемонстрировало значительный потенциал, оно позволяет надежно включить в совместную работу профилированный настил с прогонами покрытия. В свою очередь это дает возможность включить все покрытие в совместную работу со стропильными фермами, используя профлист как диафрагму жесткости [20].

Дальнейшее развитие этого направления позволит совершенствовать методики расчета и конструирования и расширять область применения таких конструктивных решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Черных Е.В., Зайдес С.А.* Анализ технологии сборки болт-заклепочных соединений с натягом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 8 (127). С. 49–57. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-49-57. EDN ZFHSCR.

2. Патент RU № 2398137 C1. Способ выполнения болтового соединения с радиальным натягом для неразъемных пакетов / *Павликова С.Ю.*; патентообл. Иркутский государственный технический университет; заявл. № 2009123958/11 от 23.06.2009; опубл. 27.08.2010. Бюл. № 24.

3. Patent CN No. 102494005 A. Washer for a bolt when fastening ultra-thin plates; Shanghai Aerospace Co; Publ. 13.06.2012.

4. *Jiang K., Zhao O.* Ferritic stainless steel thin sheet bolted connections failing by bearing–curling interaction: Testing, modelling and design // Engineering Structures. 2023. Vol. 283. P. 115919. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115919

5. Патент РФ № 2435995 C2. Заклепочная гайка и заклепочный болт, а также комбинация заклепочной гайки или заклепочного болта с листовой деталью / *Бабей Ж., Хумперт Р.*; патентообл. Профиль-Фербиндунгстехник Гмбх Унд Ко.Кг. Опубл. 10.12.2011.

6. *Крутик С.А.* Определение усилий в соединениях изгибаемых металлических элементов покрытий и перекрытий с настилом, выполненных

с использованием композитного материала на основе углеродных лент // Инженерный вестник Дона. 2021. № 3 (75). С. 409–418. EDN TPAKWB.

7. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В.* Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. Состояние проблемы // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3 (22). С. 117. EDN STRJQZ.

8. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В.* Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3 (22). С. 118. EDN STRJRJ.

9. *Туснин А.Р., Щуров Е.О.* Экспериментальные исследования клеевого соединения элементов из стали и углепластиковых композиционных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 69–73. EDN ZBTMXJ.

10. *Пятницкий А.А., Крутик С.А.* Усиление балок покрытий и перекрытий с использованием углепластика // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 57–60. EDN USJXZY.

11. Патент RU 2476651 C1. Устройство для крепления профилированного настила к балке / *Пятницкий А.А., Рубцов О.И.*; заявл. 14.10.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6. 3 с.

12. Патент RU 2835751 C1. Болтовое соединение тонкостенных стальных листов на высокопрочных болтах / *Бажин Г.М.*; заявл. 16.07.2024; опубл. 03.03.2025. Бюл. № 7. 2 с.

13. *Wang Z.Y., Wang Q.Y.* Fatigue strength of CFRP strengthened welded joints with corrugated steel plates // Composites Part B: Engineering. 2015. Vol. 72. Pp. 30–39. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.11.021

14. *Matsui T., Suzuki K., Sato S., Kubokawa Y., Nakamoto D., Davaakhishig S. et al.* Pilot demonstration of a strengthening method for steel-bolted connections using pre-formable carbon fiber cloth with VaRTM // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 9. P. 2184. DOI: 10.3390/ma14092184

15. *Jiang K., Zhao O.* Ferritic stainless steel thin sheet bolted connections failing by bearing–curling interaction: Testing, modelling and design // Engineering Structures. 2023. Vol. 283. P. 115919. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115919

16. *Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A.* Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.05.038

17. *Siwowski T.W., Siwowska P.* Experimental study on CFRP-strengthened steel beams // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 149. Pp. 12–21. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.060

18. *Yu Q.Q., Wu Y.F.* Fatigue retrofitting of cracked steel beams with CFRP laminates // Composite Structures. 2018. Vol. 192. Pp. 232–244. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.090

19. *Yu T., Fernando D., Teng J.G., Zhao X.-L.* Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Issue 5. Pp. 2279–2289. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.024

20. *Бажин Г.М.* Включение профилированного настила в совместную работу со стальным покрытием // Инновации и инвестиции. 2025. № 6. С. 690–692. EDN MPHEPF.

Поступила в редакцию 17 июня 2025 г.
Принята в доработанном виде 5 сентября 2025 г.
Одобрена для публикации 5 сентября 2025 г.

Об авторе: **Григорий Михайлович Бажин** — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 809764, ORCID: 0000-0002-7960-6421; gbajin@mail.ru.

REFERENCES

1. Chernykh E.V., Zaides S.A. Analysis of tension assembly technology of bolted and riveted joints. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017; 21(8):(127):49-57. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-49-57. EDN ZFHSCR. (rus.).

2. Patent RU No. 2398137 C1. *Method for producing a bolted connection with radial tension for non-detachable packages* / Pavlikova S.Yu.; patent pending. Irkutsk State Technical University; appl. No. 2009123958/11 23.06.2009; publ. 27.08.2010. Bull. No. 24.

3. Patent CN No. 102494005 A. *Washer for a bolt when fastening ultra-thin plates*; Shanghai Aerospace Co; Publ. 13.06.2012.

4. Jiang K., Zhao O. Ferritic stainless steel thin sheet bolted connections failing by bearing–curling

interaction: Testing, modelling and design. *Engineering Structures*. 2023; 283:115919. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115919

5. Patent RU No. 2435995 C2. *Rivet nut and rivet bolt, as well as a combination of a rivet nut or rivet bolt with a sheet metal part* / Babey J., Humpert R.; patent filed by Profil-Verbindungstechnik GmbH & Co.Kg. Published 10.12.2011.

6. Krutik S.A. Determination of forces in joints of roof and floor beams with decking using CFRP. *Engineering journal of Don*. 2021; 3(75):409-418. EDN TPAKWB. (rus.).

7. Ovchinnikov I., Ovchinnikov I., Chesnokov G., Tatiyev D., Pokulaev K. Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 1. State of the problem. *Naukovedenie*. 2014; 3(22):117. EDN STRJQZ. (rus.).

8. Ovchinnikov I., Ovchinnikov I., Chesnokov G., Tatiyev D., Pokulaev K. Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 2. Using the method of limit states to calculate bending and rupture structures. *Naukovedenie*. 2014; 3(22):118. EDN STRJRJ. (rus.).

9. Tusnin A.R., Shchurov E.O. Experimental investigation of a glue compound of elements from steel and carbon composite material. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 7:69-73. EDN ZBTMXJ. (rus.).

10. Pyatnitsky A.A., Krutik S.A. Strengthening of roof girders and floor girders with the use of carbon fiber reinforced plastic. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 6:57-60. EDN USJXZY. (rus.).

11. Patent RU 2476651 C1. *Device for fastening profiled sheeting to a beam* / Pyatnitsky A.A., Rubtsov O.I.; declared 14.10.2011; published 27.02.2013. Bulletin No. 6; 3. (rus.).

12. Patent RU 2835751 C1. *Bolted connection of thin-walled steel sheets on high-strength bolts* / Bazhin G.M.; declared 16.07.2024; published 03.03.2025. Bulletin No. 7. 2 p. (rus.).

13. Wang Z.Y., Wang Q.Y. Fatigue strength of CFRP strengthened welded joints with corrugated steel plates. *Composites Part B: Engineering*. 2015; 72:30-39. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.11.021

14. Matsui T., Suzuki K., Sato S., Kubokawa Y., Nakamoto D., Davaakhishig S. et al. Pilot demonstration of a strengthening method for steel-bolted connections using pre-formable carbon fiber cloth with VaRTM. *Materials*. 2021; 14(9):2184. DOI: 10.3390/ma14092184

15. Jiang K., Zhao O. Ferritic stainless steel thin sheet bolted connections failing by bearing–curling interaction: Testing, modelling and design. *Engineering Structures*. 2023; 283:115919. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115919

16. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 148:572-588. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.05.038

17. Siwowski T.W., Siwowska P. Experimental study on CFRP-strengthened steel beams. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 149:12-21. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.060

18. Yu Q.Q., Wu Y.F. Fatigue retrofitting of cracked steel beams with CFRP laminates. *Composite Structures*. 2018; 192:232-244. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.090

19. Yu T., Fernando D., Teng J.G., Zhao X.-L. Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(5):2279-2289. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.024

20. Bazhin G.M. Incorporation of profiled decking into composite action with steel coating. *Innovation & Investment*. 2025; 6:690-692. EDN MPHEPF. (rus.).

Received June 17, 2025.
Adopted in revised form on September 5, 2025.
Approved for publication on September 5, 2025.

Bionotes: **Grigoriy M. Bazhin** — senior lecturer of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 809764, ORCID: 0000-0002-7960-6421; gbajin@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.04
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1679-1690

Обобщенные гиперупругие потенциалы для одномерных задач из бимодульных материалов

Сергей Владимирович Кузнецов, Сергей Андреевич Калиновский
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Большое количество природных и искусственных материалов проявляют различные механические свойства при сжатии и растяжении. Такие материалы называют бимодульными. Материалы, имеющие один и тот же модуль упругости при сжатии и растяжении при испытаниях, в процессе их работы в строительных конструкциях проявляют свойства бимодульных.
Материалы и методы. Исследование связано с построением семейства однопараметрических гладких бесконечно дифференцируемых гиперупругих потенциалов для несжимаемых бимодульных материалов при одномерном движении; выводом разрешающих уравнений замкнутой формы, включая уравнение движения, уравнение совместимости Адамара и уравнение энергетического баланса; выполнением динамического анализа распространения гармонических колебаний в полубесконечном стержне. Разрабатываемый метод основан на комбинированном механико-термодинамическом подходе в сочетании с энергосберегающей явной численной схемой Лакса – Вендроффа.
Результаты. Построено семейство однопараметрических бесконечно дифференцируемых гиперупругих потенциалов для трехмерных бесконечно малых задач о бимодульных изотропных материалах, дающее набор однородных приближений к прерывистому ступенчатому модулю упругости, принятому в исходной одномерной бимодульной постановке. Введенные зависимости позволяют либо получить аналитические решения, либо вывести явные разрешающие уравнения для ряда статических и динамических задач. Доказана теорема о сходимости к разрывному модулю для бимодульных материалов.
Выводы. Фронты ударных волн, которые появляются в одномерных стержнях, изготовленных из нелинейных материалов, моделируемых семейством гладких гиперупругих потенциалов, демонстрируют, что их образование не вызвано разрывом в соотношении напряжение – деформация, соответствующем бимодульным материалам. Фронты ударных волн возникают в материалах, моделируемых рассмотренными гладкими гиперупругими потенциалами как в случае бимодульного материала, так и любого другого гиперупругого материала. Распространение фронтов ударных волн приводит к рассеянию механической энергии, что подразумевает уменьшение амплитуд с расстоянием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бимодульные материалы, гиперупругие потенциалы, фронты ударных волн, нелинейные материалы, гиперупругие материалы, уравнение совместимости Адамара, уравнение энергетического баланса, волновая динамика, вибрационные воздействия, деформационные модели

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Кузнецов С.В., Калиновский С.А.* Обобщенные гиперупругие потенциалы для одномерных задач из бимодульных материалов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1679–1690. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1679-1690

Автор, ответственный за переписку: Сергей Андреевич Калиновский, KalinovskiiSA@mgsu.ru.

Smooth hyperelastic potentials for 1d problems of bimodular materials

Sergey V. Kuznecov, Sergey A. Kalinovsky
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A large number of natural and artificial materials exhibit various mechanical properties under compression and tension. Such materials are called bimodular. It can also be noted that materials having the same modulus of elasticity under compression and tension during testing exhibit bimodular properties during their operation in building structures.
Materials and methods. The research described in the paper is related to the construction of a family of one-parameter smooth infinitely differentiable hyperelastic potentials for incompressible bimodular materials in one-dimensional motion; the derivation of closed-form solving equations, including the equation of motion, the Hadamard compatibility equation and the energy balance equation; performing a dynamic analysis of the propagation of harmonic vibrations in a semi-infinite rod. The developed method is based on a combined mechanical and thermodynamic approach combined with an energy-saving explicit numerical Lax – Wendroff scheme.
Results. A family of one-parameter infinitely differentiable hyperelastic potentials for three-dimensional infinitesimal problems on bimodular isotropic materials is constructed, which gives a set of homogeneous approximations to the discontinuous

© С.В. Кузнецов, С.А. Калиновский, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

stepwise modulus of elasticity adopted in the initial one-dimensional bimodular formulation. The introduced dependencies make it possible either to obtain analytical solutions or to derive explicit solving equations for a number of static and dynamic problems. The theorem of convergence to a discontinuous module for bimodular materials is proved.
Conclusions. Shock wave fronts that appear in one-dimensional rods made of nonlinear materials modeled by a family of smooth hyperelastic potentials clearly demonstrate that their formation is not caused by a discontinuity in the stress-strain ratio corresponding to bimodular materials. Shock wave fronts occur in materials modeled by the considered smooth hyperelastic potentials both in the case of bimodular material and any other hyperelastic material. The propagation of shock wave fronts leads to the dissipation of mechanical energy, which implies a decrease in amplitudes with distance.

KEYWORDS: bimodular materials, hyperelastic potentials, shock wave fronts, nonlinear materials, hyperelastic materials, Hadamard compatibility equation, energy balance equation, wave dynamics, vibration effects, deformation models

FOR CITATION: Kuznecov S.V., Kalinovsky S.A. Smooth hyperelastic potentials for 1d problems of bimodular materials. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1679-1690. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1679-1690 (rus.).

Corresponding author: Sergey A. Kalinovsky, KalinovskiiSA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

1.1. Краткий обзор

Большое количество природных и искусственных материалов проявляют различные механические свойства при сжатии и растяжении, например, утрамбованный грунт [1, 2], керамика [3], металлические сплавы [4], композиты [5–7] и биологические ткани [8]. Если материал имеет два разных модуля упругости при растяжении и сжатии, то такой материал называется бимодульным. Бимодульные свойства также проявляют тела, ослабленные трещинами [9, 10]. Для большинства гранулированных материалов и геоматериалов модуль упругости при сжатии выше, чем при растяжении, $E_- > E_+$ [11, 12]. В таком случае модуль упругости бимодульного материала становится таким, как показано на рис. 1.

1.1.1. Статическая задача

1.1.2. Задача на вибрационные воздействия

Исследованы свободные и вынужденные колебания дискретных систем масс, содержащих бимодульные пружины [13–19], и в упругих пластинах и оболочках [20–25]. Что касается систем с дискретной массой, основанных на модифицированной модели Кельвина с двухмодульной пружиной (рис. 2, *a*), то было обнаружено, что в зависимости от жесткости, массы и упругости пружины свободные колебания могут сопровождаться колебаниями с удвоением периода (рис. 2, *b*); хаотическим поведением; появлением странных аттракторов Пуанкаре [17, 18, 26].

1.1.3. Волновая динамика

Работы по распространению акустических волн в бимодульных средах выявили несколько интересных явлений, которые ранее не наблюдались в линейно-упругих средах (рис. 3). В частности, гармонические волны в бимодулярных стержнях проявляют: различие скоростей распространения импульсов с положительной и отрицательной деформацией; появление фронтов ударных волн, когда более быстро движущиеся импульсы обгоняют более медленно движущиеся; уменьшение амплитуды волн с увеличением расстояния от источника; формирование и распространение фронтов ударных волн при нагреве генератора [27–31]. Появление фронтов ударных волн и последующее затухание механической энергии объясняется резким изменением модуля упругости [27, 30, 32].

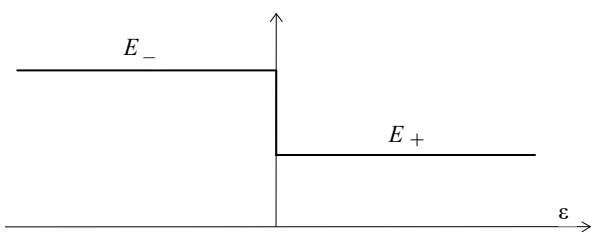


Рис. 1. Изменение модуля упругости, характерное для бимодульного материала

Fig. 1. Elastic modulus variation for a typical bimodular material

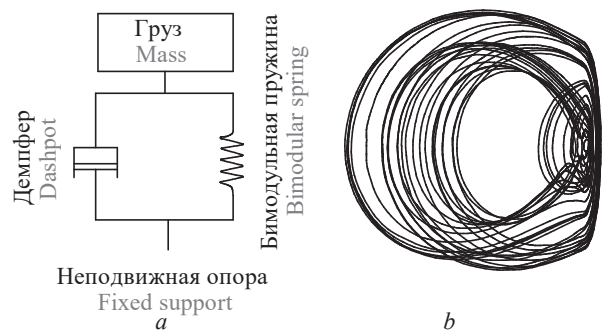


Рис. 2. Модифицированная модель Кельвина с бимодульной пружиной (*a*); типичный фазовый вид свободных колебаний в хаотическом режиме при низкой вязкости (*b*)

Fig. 2. Modified Kelvin model with bimodular spring (*a*); typical phase portrait for free oscillations in a chaotic regime at low viscosity (*b*)

1.2. Постановка задачи

Настоящее исследование связано с построением семейства однопараметрических гладких бесконечно дифференцируемых гиперупругих потенциалов для несжимаемых бимодульных материалов при одномерном движении (рис. 4); выводом разрешающих уравнений замкнутой формы, включая уравнение движения, уравнение совместимости Адамара и уравнение энергетического баланса; выполнением динамического анализа распространения гармонических колебаний в полубесконечном стержне. Разрабатываемый метод основан на комбинированном

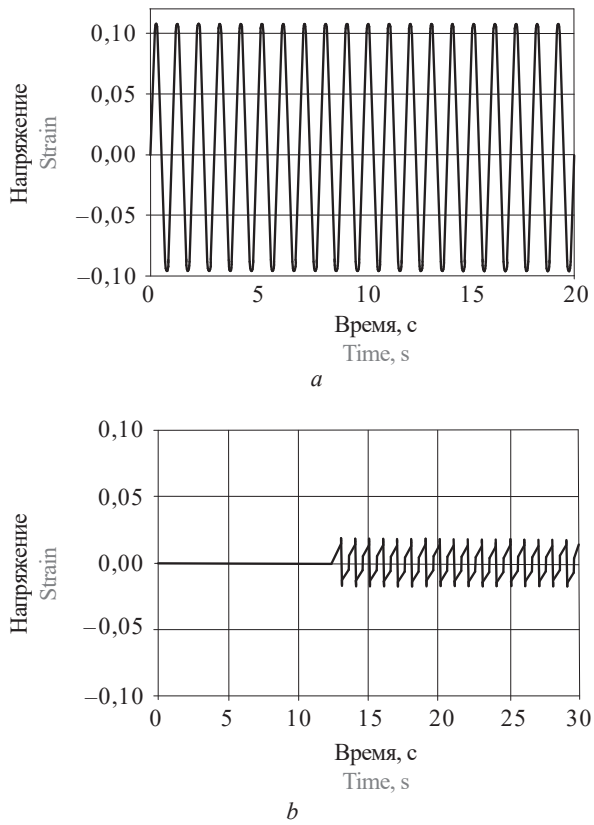


Рис. 3. Изменение смещения в полубесконечном бимодульном стержне [27]: *a* — профиль волны на краю стержня; *b* — профиль волны на расстоянии от края стержня

Fig. 3. Displacement variation in a semi-infinite bimodular rod, after [27]: *a* — wave profile at the rod edge; *b* — wave profile at a distance from the rod edge

механико-термодинамическом подходе в сочетании с энергосберегающей явной численной схемой Лакса – Вендроффа.

Существуют принципиальные преимущества рассмотренных гиперупругих потенциалов, которые обеспечивают: плавное изменение модуля упругости

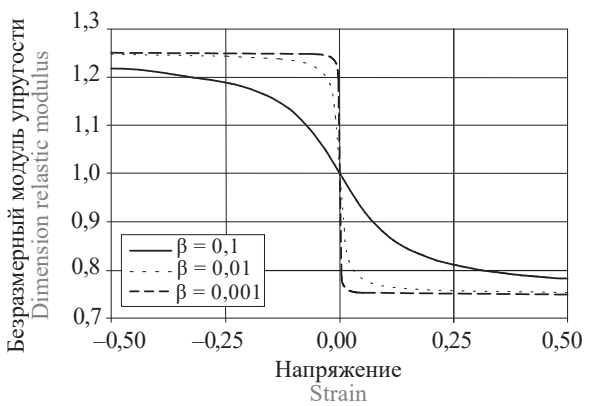


Рис. 4. Семейство гиперупругих потенциалов, обеспечивающих дифференцируемое приближение к модулю упругости бимодулярной среды (см. разделы 2 и 3)

Fig. 4. A family of hyperelastic potentials ensuring differentiable approximations to the elastic modulus of a bimodular medium (see sections 2 and 3)

в зависимости от деформации, как показано на рис. 4, по сравнению с разрывным модулем, в частности, более адекватное описание связного гранулированного материала как при статических, так и при динамических нагрузках [33–35]; возможность получения аналитических выражений для всех разрешающих уравнений, относящихся к задачам распространения волн; наблюдение за формированием и распространением фронтов ударных волн в средах, определяемых построенным семейством гиперупругих потенциалов. Таким образом, по-видимому, впервые были обнаружены движущиеся фронты ударных волн при распространении колебательных волн в нелинейных одномерных средах, подчиняющихся плавной зависимости модулей упругости от деформации. Следует также подчеркнуть, что введенные гиперупругие потенциалы обеспечивают лучшее соответствие наблюдаемым соотношениям напряжение – деформация для связных гранулированных материалов, чем бимодульная модель с резким изменением модулей упругости (рис. 1) [36, 37].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2. Основные зависимости

2.1. Гиперупругие потенциалы

Рассмотрим бесконечно малую деформацию и зависимость модуля упругости от деформации, определяемую следующими соотношениями, которые вводятся, по-видимому, впервые:

$$E(\varepsilon) = E_0\left(1-\frac{2\alpha}{\pi}\operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)\right), \qquad (2.1)$$

где $E_0 > 0$ — начальный касательный модуль при ε_0; α и β — безразмерные постоянные, $0 < \alpha < 1$, $\beta > 0$, они обеспечивают положительность $E(\varepsilon)$.

При фиксированных значениях E_0, α и изменяющемся β уравнение дает однопараметрическое семейство модулей упругости, показанное на рис. 4. Рассматриваемый модуль упругости $E(\varepsilon)$ при $\beta \to 0$ соответствует разрывному случаю, приведенному на рис. 1.

Интегральное выражение, определяющее зависимость напряжения от деформации:

$$\sigma(\varepsilon) = E_0\left(1-\frac{2\alpha\varepsilon}{\pi}\operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)+\frac{\alpha\beta}{\pi}\ln\left(1+\frac{\varepsilon^2}{\beta^2}\right)\right). \qquad (2.2)$$

Путем интегрирования выражения (2.2) получаем упругий потенциал:

$$W(\varepsilon) = \int\sigma(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{E_0}{2}\left(\varepsilon^2 - \frac{2\alpha(\beta^2-\varepsilon^2)}{\pi} + \right.$$
$$\left. + \frac{2\alpha\beta\varepsilon}{\pi}\operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)+\frac{2\alpha\beta\varepsilon}{\pi}\ln\left(1+\frac{\varepsilon^2}{\beta^2}\right)\right). \qquad (2.3)$$

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

При конкретных значениях E_0 и α получаем искомое однопараметрическое семейство бесконечно дифференцируемых гиперупругих потенциалов.

2.2. Уравнение движения

Одномерное уравнение движения, записанное в терминах поля напряжений и перемещений, может быть записано в виде [38]:

$$\partial_x \sigma(x, t) = \rho \partial_{tt} u(x, t), \tag{2.4}$$

где ρ — плотность материала, не зависящая от ε из-за предполагаемой несжимаемости; $u(x, t)$ — поле смещений, связанное с деформацией согласно линейному уравнению Коши:

$$\varepsilon(x, t) = \partial_x \sigma(x, t). \tag{2.5}$$

Подставляя полученное выражение (2.5) в уравнение движения и принимая во внимание уравнение (2.1):

$$\partial_x \sigma(\varepsilon) = (\partial_\varepsilon(\varepsilon))(\partial^2_{xx} u(x, t)); \tag{2.6}$$

далее:

$$c_0^2 \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{\partial_x u(x, t)}{\beta}\right)\right)(\partial^2_{xx} u(x, t)) = 0, \tag{2.7}$$

где c_0 — так называемая стержневая скорость [28, 39–42], определенная при $\varepsilon \to \pm 0$:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}. \tag{2.8}$$

Полученное уравнение (2.7) — это искомое нелинейное гиперболическое уравнение движения в форме поля перемещений.

2.3. Граничные и начальные условия

Рассмотрим полубесконечный стержень с нагрузкой в виде сосредоточенной силы, приложенной к левому концу ($x = 0$), и условиями затухания Зоммерфельда, приложенными к бесконечно удаленному правому краю [43, 44]:

$$\sigma(x, t)\big|_{x=0} = f(t); \quad u(x, t)\big|_{x\to\infty} = \sigma(x, t)\big|_{x\to\infty} = 0, \tag{2.9}$$

где $f(t)$ — приложенная силовая нагрузка. Начальные условия соответствуют состоянию покоя:

$$u(x, t)\big|_{t=0} = \partial_t u(x, t)\big|_{t=0} = 0. \tag{2.10}$$

2.4. Условие совместимости по Адамару

Если возникает разрыв, связанный с формированием и распространением фронта ударной волны, следует сформулировать условия совместимости по Адамару [45]:

$$\left[\partial_t u(x, t)\right] = -c_{\text{удар}} \left[\partial_x u(x, t)\right], \tag{2.11}$$

где квадратные скобки обозначают скачок, вызванный пространственным разрывом, а $c_{\text{удар}}$ — скорость распространения фронта ударной волны. Заметим, что, согласно уравнению, знак скачка скорости распространения зависит от знаков соответствующих скачков скорости частиц $\left[\partial_t u(x, t)\right]$ и деформации $\left[\partial_x u(x, t)\right]$ [46].

2.5. Энергетический баланс

Известно [45], что формирование и распространение фронтов ударных волн сопровождается затуханием механической энергии и одновременно выделением тепла. Уравнение энергетического баланса можно записать в виде [45]:

$$F(t) = E_k(t) + E_s(t) + Q(t), \tag{2.12}$$

где $F(t)$ — работа внешних сил:

$$F(t) = f(t)\, \partial_t u(0, t); \tag{2.13}$$

$E_k(t)$ и $E_s(t)$ — кинетическая энергия и энергия деформации соответственно [43]:

$$Ek(t) = \frac{\rho}{2} \int_0^\infty \left(\partial_t u(x, t)\right)^2 dx; \tag{2.14}$$

$Q(t)$ — тепловая энергия, определяемая путем интегрирования удельной тепловой энергии $q(x, t)$:

$$Q(t) = \frac{\rho}{2} \int_0^\infty q(x, t)\, dx. \tag{2.15}$$

2.6. Явная формулировка условия Куранта – Фридрихса – Леви

Численный метод Лакса – Вендроффа [47] используется для решения уравнений (2.7)–(2.12). Принимая во внимание условную сходимость обычных явных численных схем [48], на приращение времени накладывается условие Куранта – Фридрихса – Леви:

$$\Delta t < \Delta t_{CFL} \equiv \frac{\Delta x}{\max c(\varepsilon)}, \tag{2.16}$$

где Δt и Δx — временные и пространственные приращения соответственно; Δt_{CFL} — временное приращение Куранта – Фридрихса – Леви; $c(\varepsilon)$ — стержневая скорость, определяемая следующим выражением:

$$c(\varepsilon) = c_0 \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)}, \tag{2.17}$$

которое вытекает из уравнения (2.1).

Также известно, что явные численные схемы второго порядка подвержены появлению нефизических колебаний из-за ошибок округления. Эти колебания могут быть значительно уменьшены, если частота нагрузки удовлетворяет следующей эмпирической оценке [49, 50]:

$$\omega < \frac{1}{\eta \Delta t_{CFL}}, \tag{2.18}$$

где $\eta \geq 20$.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Предварительные данные

Ввод безразмерных переменных:

$$E^*(\varepsilon)=\frac{E(\varepsilon)}{E_0};\ \sigma^*(\varepsilon)=\frac{\sigma(\varepsilon)}{E_0};\ c^*(\varepsilon)=\frac{c(\varepsilon)}{c_0}. \quad (3.1)$$

В дальнейшем при безразмерных переменных звездочки будут опущены. Если принять:

$$\alpha = 0{,}25, \quad (3.2)$$

и изменяя β в интервале $\beta \in (10^{-3}; 10^{-1})$, рассмотрим зависимости напряжения и скорости вращения стержня от деформации (рис. 5).

Графики на рис. 4 и 5 показывают, что при достаточно малом значении параметра β, скажем β = 0,001, касательный модуль гиперупругого материала приблизительно равен бимодульному модулю, показанному на рис. 1, с относительной постоянной погрешностью δ:

$$\delta=\frac{\max\limits_{\varepsilon>0}\left|E_{\text{бим}}-E_{\text{гип}}\right|}{\max E_{\text{бим}}}\Bigg|_{\beta=0{,}001}\approx 5\cdot10^{-4}, \quad (3.3)$$

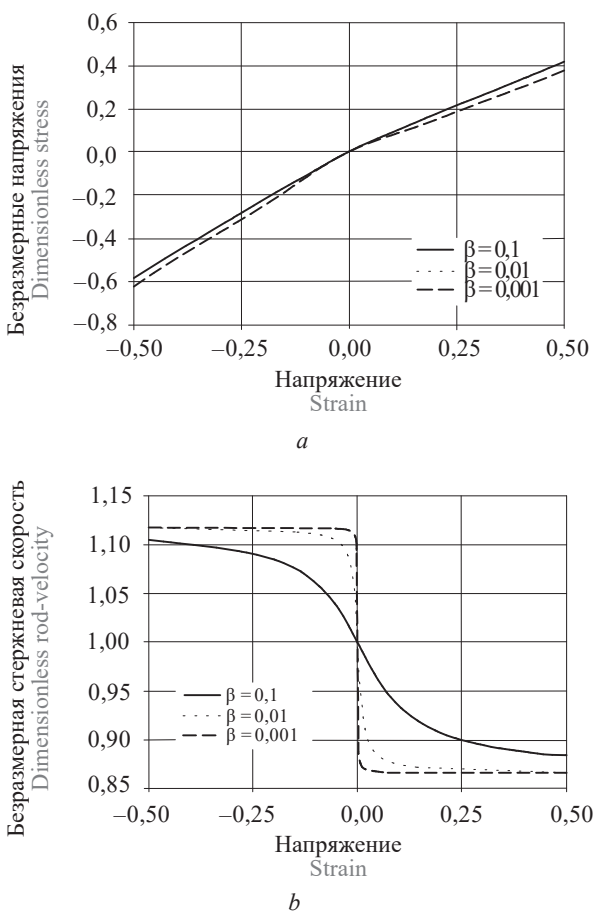


Рис. 5. Зависимость напряжения от деформации (*a*); зависимость стержневой скорости от деформации (*b*)

Fig. 5. Stress vs. strain (*a*); rod velocity vs. strain (*b*)

где $E_{\text{бим}}$ и $E_{\text{гип}}$ — соответствующие модули упругости.

3.2. Распространение волн

Рассмотрим теперь распространение изначально гармонической волны для двух предельных значений β = 0,1 и β = 0,001.

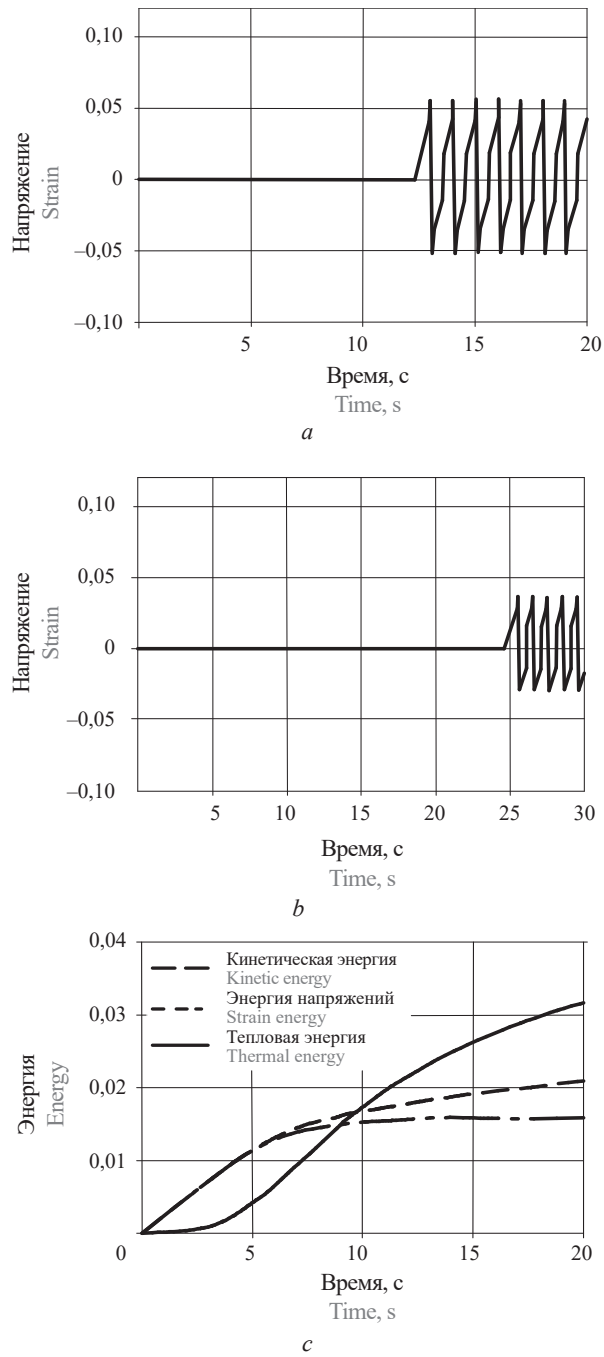


Рис. 6. Зависимость изменения деформации от времени: в точке 1 (*a*); в точке 2 (*b*); зависимость изменения энергии от времени (*c*); угловая частота гармонических колебаний ω = 1 рад/с; координаты точек наблюдения определяются согласно уравнению (3.4)

Fig. 6. Strain variation vs. time, at point 1 (*a*); strain variation vs. time, at point 2 (*b*); energy variation vs. time (*c*); harmonic loading, ω = 1 rad/s; coordinates of points of observation are specified in Eq. (3.4)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

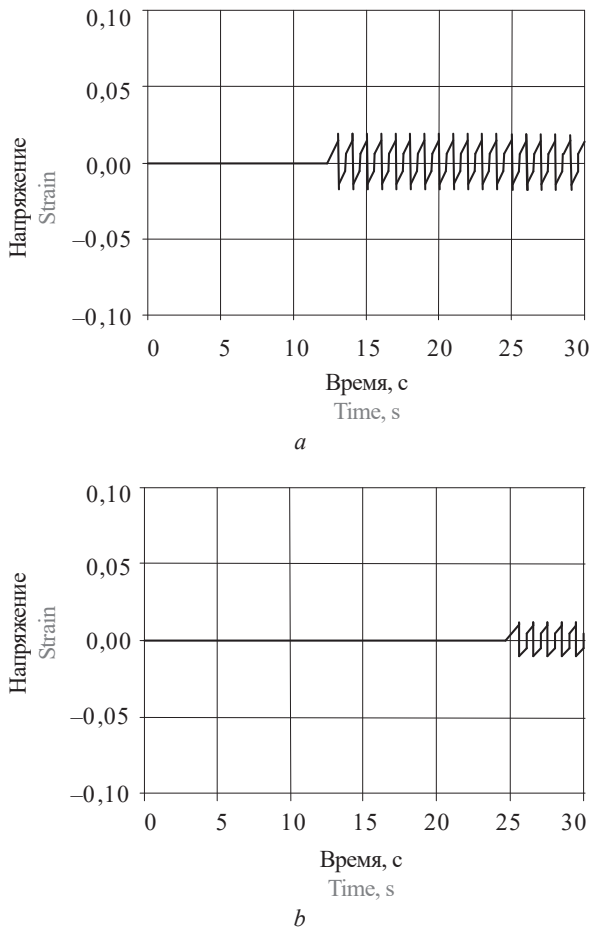


Рис. 7. Зависимость изменения деформации от времени: в точке 1 (*a*); в точке 2 при угловой частоте гармонических колебаний ω = 1 рад/с (*b*); координаты точек наблюдения в соответствии с уравнением (3.4)

Fig. 7. Strain variation vs. time, at point 1 (*a*); strain variation vs. time, at point 2 harmonic loading, ω = 1

3.2.1. В случае, если β = 0,1

Этот случай соответствует плавному изменению модуля упругости (рис. 4). Графики на рис. 6 показывают осциллограммы для двух точек, расположенных на определенных расстояниях l_k от левого конца стержня:

$$l_k = c_0 t_k;\ k = 1,2;\ t_1 = 10\frac{2\pi}{\omega};\ t_2 = 20\frac{2\pi}{\omega}, \qquad (3.4)$$

где скорость c_0 определяется уравнением (2.8); ω — круговая частота гармонической нагрузки.

Деформация в начальной точке при $x = 0$ показана на рис. 3. Вертикальные линии на рис. 6, *a*, *b* соответствуют фронтам ударных волн, которые появляются, когда более быстрые движущиеся части волновых цепей обгоняют более медленные движущиеся части [45, 51–54]. Уменьшение величины деформации сопровождается потерей механической энергии и в то же время выделением тепловой энергии (рис. 6, *c*). Таким образом, по-видимому, впервые фронты ударных волн и потеря механической энергии наблюдаются в гиперупругой системе без

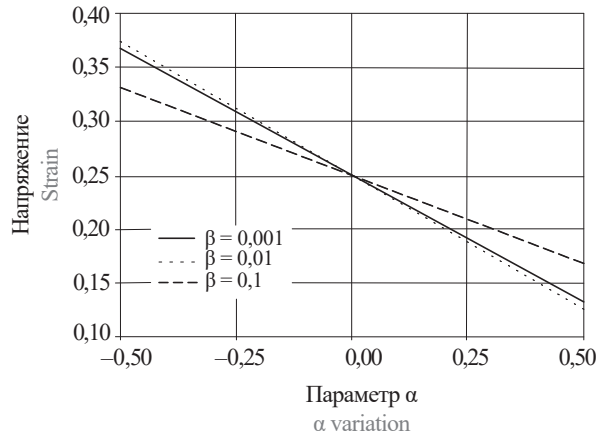


Рис. 8. Зависимость изменения напряжения от параметра α при различных значениях β и при $E_0 = 1$, ε = 0,25, в соответствии с уравнением (2.2)

Fig. 8. Stress variation versus α variation at different β and at $E_0 = 1$, ε = 0.25, according to Eq. (2.2)

внутреннего трения и вязкости, подчиняющейся плавному (и бесконечно дифференцируемому) гиперупругому потенциалу.

3.2.2. В случае, если β = 0,001

Как указывалось ранее, этот случай обеспечивает C^∞ — приближение к соответствующей бимодульной среде с небольшой погрешностью, задаваемой уравнением (3.3). Волновой профиль для рассматриваемого случая визуально почти точно соответствует профилю для бимодульной среды (рис. 3), найденному в работах [27, 30]. Графики изменения деформации в зависимости от времени для рассматриваемого случая представлены на рис. 7.

Сравнение графиков на рис. 7 и соответствующих графиков на рис. 6 показывает разницу в магнитудах — при β = 0,001 магнитуды меньше, чем при β = 0,1. Однако фронты ударной волны и затухание волны все еще присутствуют при β = 0,1, когда модуль упругости плавно изменяется. Изменение энергии для рассматриваемого случая аналогично случаю β = 0,1. Другое замечание касается состояния статической нагрузки и изменения напряжения, определяемого уравнением, из-за изменения параметра α. На рис. 8 продемонстрировано, что при $\beta \le 0{,}01$ графики сливаются, стремясь к соответствующему графику для прерывистого случая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построено семейство однопараметрических гладких и бесконечно дифференцируемых гиперупругих потенциалов, зависящих от переменного параметра β и двух настраиваемых «физических» параметров E_0, α. Эти потенциалы подходят для анализа одномерных задач статики и динамики бимодульных материалов. При $\beta \to 0$ введенные потенциалы обеспечивают равномерное приближение соответствующих модулей упругости к разрывному модулю бимодульного материала. Например, апо-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

стериорная оценка показала, что при достаточно малом $\beta = 0{,}001$ равномерная погрешность δ не превышает $5 \cdot 10^{-4}$.

И, что может быть еще более важным, эти возможности лучше подходят для моделирования реальных когезионных гранулированных материалов, чем бимодульная модель с резким изменением модуля упругости (рис. 1). В связи с этим (см. экспериментальные работы [36, 37]) бимодульная модель, используемая для неоднородных материалов, подвергалась критике ввиду физически неоправданного скачка модулей упругости [55].

Еще одно замечание касается интересного явления, связанного с образованием и распространением фронтов ударных волн в сверхупругих средах с бесконечно дифференцируемыми потенциалами (рис. 6, 7). Следует отметить, что ранее это явление связывали со скачком модуля упругости [27, 30], в то время как C. Truesdell [56] показал принципиальную возможность формирования фронтов ударных волн при распространении акустических волн в твердых средах, определяемых любым гиперупругим потенциалом [45]. Таким образом, наблюдаемые фронты ударных волн, которые появляются в одномерных стержнях, изготовленных из нелинейных материалов, моделируемых семейством гладких гиперупругих потенциалов, демонстрируют, что их образование не вызвано разрывом в соотношении напряжение – деформация, соответствующем бимодульным материалам (рис. 1). Фронты ударных волн возникают в материалах, моделируемых рассмотренными гладкими гиперупругими потенциалами (рис. 4) как в случае бимодульного материала, так и любого другого гиперупругого материала. Распространение фронтов ударных волн приводит к рассеянию механической энергии, что подразумевает уменьшение амплитуд с расстоянием (для сравнения рис. 3, 6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Misseri G., Rovero L.* Rammed earth as bi-modulus material: Experimental and analytical investigations through Euler-Bernoulli and Timoshenko beam models // International Journal of Masonry Research and Innovation. 2022. Vol. 7. Issue 5. P. 482. DOI: 10.1504/ijmri.2022.125359

2. *Ковтанюк Л.В., Панченко Г.Л., Попова Е.О.* К моделированию больших деформаций разномодульных упругих сред // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 1 (55). С. 5–12. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.001. EDN DZJIJP.

3. *Caporale A., Parisi F., Asprone D., Luciano R., Prota A.* Critical surfaces for adobe masonry: Micromechanical approach // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. Pp. 790–796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.087

4. *Guo Y., Wen S.R., Sun J.Y., He X.T.* Theoretical study on thermal stresses of metal bars with different moduli in tension and compression // Metals. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 347. DOI: 10.3390/met12020347

5. *Qiu Y., Shen W., Yan R., Li X., Ye Z., Li M. et al.* An improved numerical method for calculating mechanical properties of bi-modulus sandwich composite structures // Ocean Engineering. 2022. Vol. 250. P. 110998. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110998

6. *Адамов А.А.* Методические проблемы экспериментального обоснования и верификации определяющих уравнений разномодульной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 6 (364). С. 82–90. DOI: 10.15372/PMTF20200611. EDN HLBYZF.

7. *Кривчун Н.А., Уманская О.Л.* Изгиб составной пластины из разномодульных материалов. Краевые условия // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6–1. С. 56–60. DOI: 10.17513/snt.38071. EDN PVOOJE.

8. *Rosakis P., Notbohm J., Ravichandran G.* A model for compression-weakening materials and the elastic fields due to contractile cells // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. Vol. 85. Pp. 16–32. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.08.013

9. *Назаров В.Е., Кияшко С.Б., Радостин А.В.* Самоподобные волны в средах с разномодульной упругой нелинейностью и релаксацией // Нелинейная динамика. 2015. Т. 11. № 2. С. 209–218. EDN UBLNYP.

10. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* О разрушении при сжатии // Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21. № 3. С. 86–102. DOI: 10.24411/1683-805X-2018-13009. EDN XRGSGL.

11. *Patel S., Martin C.D.* Application of flattened Brazilian test to investigate rocks under confined extension // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. Vol. 51. Issue 12. Pp. 3719–3736. DOI: 10.1007/s00603-018-1559-1

12. *Пахомов Б.М.* Вариант модели изотропного разномодульного материала // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 6 (117). С. 35–48. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-35-48. EDN ZVZBQL.

13. *Jiang K., Qi C., Zhu S., Jin T.* Study of the frequency response of the block–rock mass with bimodulus characteristics // IOP Conference Series: Earth and En-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

vironmental Science. 2020. Vol. 570. Issue 5. P. 052006. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052006

14. *Mahfouz I.A., Badrakhan F.* Chaotic behaviour of some piecewise-linear systems. Part I: systems with set-up spring or with unsymmetric elasticity // Journal of Sound and Vibration. 1990. Vol. 143. Issue 2. Pp. 255–288. DOI: 10.1016/0022-460x(90)90954-x

15. *Ostrovsky A.* Wave processes in media with strong acoustic nonlinearity // The Journal of the Acoustical Society of America. 1991. Vol. 90. Issue 6. Pp. 3332–3337. DOI: 10.1121/1.401444

16. *Ostrovsky L.A., Starobinets I.M.* Transitions and statistical characteristics of vibrations in a bimodular oscillator // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 1995. Vol. 5. Issue 3. Pp. 496–500. DOI: 10.1063/1.166121

17. *Shaw S.W., Holmes P.J.* A periodically forced piecewise linear oscillator // Journal of Sound and Vibration. 1983. Vol. 90. Issue 1. Pp. 129–155. DOI: 10.1016/0022-460x(83)90407-8

18. *Shulman J.N.* Chaos in piecewise-linear systems // Physical Review A. 1983. Vol. 28. Issue 1. Pp. 477–479. DOI: 10.1103/physreva.28.477

19. *Zhou N., Liu K.* A tunable high-static–low-dynamic stiffness vibration isolator // Journal of Sound and Vibration. 2010. Vol. 329. Issue 9. Pp. 1254–1273. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.11.001

20. *Bert C.W., Kumar M.* Vibration of cylindrical shells of bimodulus composite materials // Journal of Sound and Vibration. 1982. Vol. 81. Issue 1. Pp. 107–121. DOI: 10.1016/0022-460x(82)90180-8

21. *Bert C.W., Reddy J.N., Chao W.C., Reddy V.S.* Vibration of thick rectangular plates of bimodulus composite material // Journal of Applied Mechanics. 1981. Vol. 48. Issue 2. Pp. 371–376. DOI: 10.1115/1.3157625

22. *Du L., Li F., Liu Q.* A study on determination of application limits of bimodulus calculation using spherical stress tensor method // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2017. Vol. 36. Issue 7. Pp. 479–490. DOI: 10.1177/0731684416684210

23. *Khan A.H., Patel B.P.* Nonlinear forced vibration response of bimodular laminated composite plates // Composite Structures. 2014. Vol. 108. Pp. 524–537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.054

24. *Khan K., Patel B.P., Nath Y.* Free and forced vibration characteristics of bimodular composite laminated circular cylindrical shells // Composite Structures. 2015. Vol. 126. Pp. 386–397. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.022

25. *Lucchesi M., Pagni A.* Longitudinal oscillations of bimodular rods // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2005. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–54. DOI: 10.1142/S0219455405001490

26. *Moon F.C.* Chaotic Vibrations. John Wiley & Sons, 1987. 309 p.

27. *Gavrilov S.N., Herman G.C.* Wave propagation in a semi-infinite heteromodular elastic bar subjected to a harmonic loading // Journal of Sound and Vibration. 2012. Vol. 331. Issue 20. Pp. 4464–4480. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.05.022

28. *Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V.* Pochhammer–Chree waves: polarization of the axially symmetric modes // Archive of Applied Mechanics. 2018. Vol. 88. Issue 8. Pp. 1385–1394. DOI: 10.1007/s00419-018-1377-7

29. *Krylov V.V.* Acoustic black holes for flexural waves: a smart approach to vibration damping // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.150

30. *Kuznetsova M., Khudyakov M., Sadovskii V.* Wave propagation in continuous bimodular media // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2022. Vol. 29. Issue 21. Pp. 3147–3162. DOI: 10.1080/15376494.2021.1889725

31. *Trujillo L., Peniche F., Sigalotti L.D.G.* Derivation of a Schrödinger-like equation for elastic waves in granular media // Granular Matter. 2010. Vol. 12. Issue 4. Pp. 417–436. DOI: 10.1007/s10035-010-0190-y

32. *Дудко О.В., Лаптева А.А., Рагозина В.Е.* Нестационарные одномерные динамические задачи разномодульной упругости с кусочно-линейной аппроксимацией краевых условий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 4. С. 37–47. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.04. EDN PCRUTF.

33. *Grazzini R., Misseri G., Rovero L.* A bimodulus material model for bending test on NHL3.5 lime mortar // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 2. P. 486. DOI: 10.3390/ma16020486

34. *Sun J., Zhu H., Qin S., Yang D., He X.* A review on the research of mechanical problems with different moduli in tension and compression // Journal of Mechanical Science and Technology. 2010. Vol. 24. Issue 9. Pp. 1845–1854. DOI: 10.1007/s12206-010-0601-3

35. *Zhang X., Garijo L., Ruiz G., Ortega J.* Loading-rate effect on the fracture response of natural hydraulic and aerial-lime mortars // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32. Issue 9. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003358

36. *Hemmerle A., Schröter M., Goehring L.* A cohesive granular material with tunable elasticity // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.1038/srep35650

37. *Makse H.A., Gland N., Johnson D., Schwartz L.* Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics // Physical Review E. 2004. Vol. 70. Issue 6. DOI: 10.1103/physreve.70.061302

38. *Royer D., Dieulesaint E.* Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation. Springer, 1996. 374 p.

39. *Zemanek J.* An experimental and theoretical investigation of elastic wave propagation in a cylinder // The Journal of the Acoustical Society

of America. 1972. Vol. 51. Issue 1B. Pp. 265–283. DOI: 10.1121/1.1912838

40. *Goldstein R.V., Dudchenko A.V., Kuznetsov S.V.* The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading // Archive of Applied Mechanics. 2016. Vol. 86. Issue 12. Pp. 2021–2031. DOI: 10.1007/s00419-016-1169-x

41. *Goldstein R.V., Kuznetsov S.V.* Long-wave Asymptotics of Lamb waves // Mechanics of Solids. 2017. Vol. 52. Issue 6. Pp. 700–707. DOI: 10.3103/s0025654417060097

42. *Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.V.* Velocities, dispersion, and energy of SH-waves in anisotropic laminated plates // Acoustical Physics. 2014. Vol. 60. Issue 2. Pp. 200–207. DOI: 10.1134/s106377101402002x

43. *Cacciafesta F., D'Ancona P., Lucà R.* A limiting absorption principle for the Helmholtz equation with variable coefficients // Journal of Spectral Theory. 2018. Vol. 8. Issue 4. Pp. 1349–1392. DOI: 10.4171/jst/229

44. *Макаров О.И., Шанин А.В., Корольков А.И.* Интеграл Зоммерфельда в задачах моделирования дифракции акустических волн с помощью треугольной сетки // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 2. С. 129–145. DOI: 10.31857/S0320791923600105. EDN IULQGZ.

45. *Truesdell C., Noll W.* The Non-Linear Field Theories of Mechanics. Springer Berlin Heidelberg. 2004. 602 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10388-3

46. *Kuznetsov S.V.* Abnormal dispersion of flexural Lamb waves in functionally graded plates // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2019. Vol. 70. Issue 3. DOI: 10.1007/s00033-019-1132-0

47. *Lax P.D.* Hyperbolic Systems of Conservation Laws and the Mathematical Theory of Shock Waves. SIAM, Philadelphia, 1973. DOI: 10.1137/1.9781611970562

48. *Костиков Ю.А., Романенков А.М.* Гибридная схема для численного решения нелинейного уравнения Эйлера // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2021. № 2. С. 80–86. EDN BCJXPC.

49. *Cellier F.E., Kofman E.* Continuous System Simulation. Springer Science & Business Media, Berlin, 2006.

50. *Kravtsov A.V., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Ya.* Finite element models in Lamb's problem // Mechanics of Solids. 2011. Vol. 46. Issue 6. Pp. 952–959. DOI: 10.3103/s002565441106015x

51. *Kuznetsov S.V.* "Forbidden" planes for Rayleigh waves // Quarterly of Applied Mathematics. 2002. Vol. 60. Issue 1. Pp. 87–97. DOI: 10.1090/qam/1878260

52. *Kuznetsov S.V.* Subsonic Lamb waves in anisotropic plates // Quarterly of Applied Mathematics. 2002. Vol. 60. Issue 3. Pp. 577–587. DOI: 10.1090/qam/1914442

53. *Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.* Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 109. Pp. 69–81. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.019

54. *Быков В.Г.* Формирование режимов скольжения в разломах и медленные деформационные волны // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 4. С. 39–46. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-14004. EDN OHCQWY.

55. *Kuznetsov S.V., Terentjeva E.O.* Planar internal Lamb problem: Waves in the epicentral zone of a vertical power source // Acoustical Physics. 2015. Vol. 61. Issue 3. Pp. 356–367. DOI: 10.1134/s1063771015030112

56. *Truesdell C.* General and exact theory of waves in finite elastic strain // Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1961. Vol. 8. Issue 1. Pp. 263–296. DOI: 10.1007/bf00277444

Поступила в редакцию 10 июня 2025 г.
Принята в доработанном виде 1 июля 2025 г.
Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

Об авторах: **Сергей Владимирович Кузнецов** — доктор физико-математических наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 7202573564, ResearcherID: H-9448-2013, ORCID: 0000-0001-9426-0791; KuznetsovSV@mgsu.ru;

Сергей Андреевич Калиновский — 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; РИНЦ ID: 670367, Scopus: 57202802927, ResearcherID: AAR-1204-2021, ORCID: 0000-0001-6780-5215; KuznetsovSV@mgsu.ru.

Вклад авторов:
Кузнецов С.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.
Калиновский С.А. — обработка материала, доработка текста, оформление статьи.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Misseri G., Rovero L. Rammed earth as bi-modulus material: Experimental and analytical investigations through Euler-Bernoulli and Timoshenko beam models. *International Journal of Masonry Research and Innovation*. 2022; 7(5):482. DOI: 10.1504/ijmri.2022.125359

2. Kovtanyuk L.V., Panchenko G.L., Popova E.O. On modeling of large strains of multimodulus elastic media. *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State.* 2023; 1(55):5-12. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.001. EDN DZJIJP. (rus.).

3. Caporale A., Parisi F., Asprone D., Luciano R., Prota A. Critical surfaces for adobe masonry: Micromechanical approach. *Composites Part B: Engineering*. 2014; 56:790-796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.087

4. Guo Y., Wen S.R., Sun J.Y., He X.T. Theoretical study on thermal stresses of metal bars with different moduli in tension and compression. *Metals*. 2022; 12(2):347. DOI: 10.3390/met12020347

5. Qiu Y., Shen W., Yan R., Li X., Ye Z., Li M. et al. An improved numerical method for calculating mechanical properties of bi-modulus sandwich composite structures. *Ocean Engineering*. 2022; 250:110998. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110998

6. Adamov A.A. Methodological problems in experimental studies and verification of the governing equations of the theory of elasticity for an isotropic body with different moduli in tension and compression. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020; 61(6):(364):82-90. DOI: 10.15372/PMTF20200611. EDN HLBYZF. (rus.).

7. Krivchun N.A., Umanskaya O.L. Bending a composite plate made of multi-modulus materials. Boundary condition. *Modern High Technologies.* 2020; 6-1:56-60. DOI: 10.17513/snt.38071. EDN PVOOJE. (rus.).

8. Rosakis P., Notbohm J., Ravichandran G. A model for compression-weakening materials and the elastic fields due to contractile cells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2015; 85:16-32. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.08.013

9. Nazarov V.E., Kiyashko S.B., Radostin A.V. Self-similar waves in media with bimodular elastic nonlinearity and relaxation. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics.* 2015; 11(2):209-218. EDN UBLNYP. (rus.).

10. Goldstein R.V., Osipenko N.M. About compression fracture. *Physical Mesomechanics.* 2018; 21(3):86-102. DOI: 10.24411/1683-805X-2018-13009. EDN XRGSGL. (rus.).

11. Patel S., Martin C.D. Application of flattened Brazilian test to investigate rocks under confined extension. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018; 51(12):3719-3736. DOI: 10.1007/s00603-018-1559-1

12. Pakhomov B.M. Alternative model of isotropic material with different modulus. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering.* 2017; 6(117):35-48. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-35-48. EDN ZVZBQL. (rus.).

13. Jiang K., Qi C., Zhu S., Jin T. Study of the frequency response of the block–rock mass with bimodulus characteristics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 570(5):052006. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052006

14. Mahfouz I.A., Badrakhan F. Chaotic behaviour of some piecewise-linear systems. Part I: systems with set-up spring or with unsymmetric elasticity. *Journal of Sound and Vibration*. 1990; 143(2):255-288. DOI: 10.1016/0022-460x(90)90954-x

15. Ostrovsky A. Wave processes in media with strong acoustic nonlinearity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1991; 90(6):3332-3337. DOI: 10.1121/1.401444

16. Ostrovsky L.A., Starobinets I.M. Transitions and statistical characteristics of vibrations in a bimodular oscillator. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 1995; 5(3):496-500. DOI: 10.1063/1.166121

17. Shaw S.W., Holmes P.J. A periodically forced piecewise linear oscillator. *Journal of Sound and Vibration*. 1983; 90(1):129-155. DOI: 10.1016/0022-460x(83)90407-8

18. Shulman J.N. Chaos in piecewise-linear systems. *Physical Review A*. 1983; 28(1):477-479. DOI: 10.1103/physreva.28.477

19. Zhou N., Liu K. A tunable high-static–low-dynamic stiffness vibration isolator. *Journal of Sound and Vibration*. 2010; 329(9):1254-1273. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.11.001

20. Bert C.W., Kumar M. Vibration of cylindrical shells of bimodulus composite materials. *Journal of Sound and Vibration*. 1982; 81(1):107-121. DOI: 10.1016/0022-460x(82)90180-8

21. Bert C.W., Reddy J.N., Chao W.C., Reddy V.S. Vibration of thick rectangular plates of bimodulus composite material. *Journal of Applied Mechanics*. 1981; 48(2):371-376. DOI: 10.1115/1.3157625

22. Du L., Li F., Liu Q. A study on determination of application limits of bimodulus calculation using spherical stress tensor method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017; 36(7):479-490. DOI: 10.1177/0731684416684210

23. Khan A.H., Patel B.P. Nonlinear forced vibration response of bimodular laminated composite plates. *Composite Structures*. 2014; 108:524-537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.054

24. Khan K., Patel B.P., Nath Y. Free and forced vibration characteristics of bimodular composite laminated circular cylindrical shells. *Composite Structures*. 2015; 126:386-397. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.022

25. Lucchesi M., Pagni A. Longitudinal oscillations of bimodular rods. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2005; 5(1):37-54. DOI: 10.1142/S0219455405001490

26. Moon F.C. *Chaotic Vibrations*. John Wiley & Sons, 1987; 309.

27. Gavrilov S.N., Herman G.C. Wave propagation in a semi-infinite heteromodular elastic bar subjected to a harmonic loading. *Journal of Sound and Vibration*. 2012; 331(20):4464-4480. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.05.022

28. Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V. Pochhammer–Chree waves: polarization of the axially symmetric modes. *Archive of Applied Mechanics*. 2018; 88(8):1385-1394. DOI: 10.1007/s00419-018-1377-7

29. Krylov V.V. Acoustic black holes for flexural waves: a smart approach to vibration damping. *Procedia Engineering*. 2017; 199:56-61. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.150

30. Kuznetsova M., Khudyakov M., Sadovskii V. Wave propagation in continuous bimodular media. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022; 29(21):3147-3162. DOI: 10.1080/15376494.2021.1889725

31. Trujillo L., Peniche F., Sigalotti L.D.G. Derivation of a Schrödinger-like equation for elastic waves in granular media. *Granular Matter*. 2010; 12(4):417-436. DOI: 10.1007/s10035-010-0190-y

32. Dudko O.V., Lapteva A.A., Ragozina V.E. Nonstationary 1D dynamics problems for heteromodular elasticity with piecewise-linear approximation of boundary conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019; 4:37-47. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.04. EDN PCRUTF. (rus.).

33. Grazzini R., Misseri G., Rovero L. A bimodulus material model for bending test on NHL3.5 lime mortar. *Materials*. 2023; 16(2):486. DOI: 10.3390/ma16020486

34. Sun J., Zhu H., Qin S., Yang D., He X. A review on the research of mechanical problems with different moduli in tension and compression. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010; 24(9):1845-1854. DOI: 10.1007/s12206-010-0601-3

35. Zhang X., Garijo L., Ruiz G., Ortega J. Loading-rate effect on the fracture response of natural hydraulic and aerial-lime mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020; 32(9). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003358

36. Hemmerle A., Schröter M., Goehring L. A cohesive granular material with tunable elasticity. *Scientific Reports*. 2016; 6(1). DOI: 10.1038/srep35650

37. Makse H.A., Gland N., Johnson D., Schwartz L. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics. *Physical Review E*. 2004; 70(6). DOI: 10.1103/physreve.70.061302

38. Royer D., Dieulesaint E. *Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation*. Springer, 1996; 374.

39. Zemanek J. An experimental and theoretical investigation of elastic wave propagation in a cylinder. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1972; 51(1B):265-283. DOI: 10.1121/1.1912838

40. Goldstein R.V., Dudchenko A.V., Kuznetsov S.V. The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading. *Archive of Applied Mechanics*. 2016; 86(12):2021-2031. DOI: 10.1007/s00419-016-1169-x

41. Goldstein R.V., Kuznetsov S.V. Long-wave Asymptotics of Lamb waves. *Mechanics of Solids*. 2017; 52(6):700-707. DOI: 10.3103/s0025654417060097

42. Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.V. Velocities, dispersion, and energy of SH-waves in anisotropic laminated plates. *Acoustical Physics*. 2014; 60(2):200-207. DOI: 10.1134/s106377101402002x

43. Cacciafesta F., D'Ancona P., Lucà R. A limiting absorption principle for the Helmholtz equation with variable coefficients. *Journal of Spectral Theory*. 2018; 8(4):1349-1392. DOI: 10.4171/jst/229

44. Makarov O.I., Shanin A.V., Korolkov A.I. The Sommerfeld integral in problems of modeling acoustic wave diffraction using a triangular grid. *Acoustical Physics*. 2023; 69(2):129-145. DOI: 10.31857/S0320791923600105. EDN IULQGZ. (rus.).

45. Truesdell C., Noll W. *The Non-Linear Field Theories of Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, 2004; 602. DOI: 10.1007/978-3-662-10388-3

46. Kuznetsov S.V. Abnormal dispersion of flexural Lamb waves in functionally graded plates. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2019; 70(3). DOI: 10.1007/s00033-019-1132-0

47. Lax P.D. *Hyperbolic Systems of Conservation Laws and the Mathematical Theory of Shock Waves*. SIAM, Philadelphia, 1973. DOI: 10.1137/1.9781611970562

48. Kostikov Yu.A., Romanenkov A.M. Hybrid scheme for the numerical solution of a nonlinear Euler's equation. *Differential Equations and Control Processes*. 2021; 2:80-86. EDN BCJXPC. (rus.).

49. Cellier F.E., Kofman E. *Continuous System Simulation*. Springer Science & Business Media, Berlin, 2006.

50. Kravtsov A.V., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Ya. Finite element models in Lamb's problem. *Mechanics of Solids*. 2011; 46(6):952-959. DOI: 10.3103/s002565441106015x

51. Kuznetsov S.V. "Forbidden" planes for Rayleigh waves. *Quarterly of Applied Mathematics*. 2002; 60(1):87-97. DOI: 10.1090/qam/1878260

52. Kuznetsov S.V. Subsonic Lamb waves in anisotropic plates. *Quarterly of Applied Mathematics*. 2002; 60(3):577-587. DOI: 10.1090/qam/1914442

53. Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S. Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains. *Computers and Geotechnics*. 2019; 109:69-81. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.019

54. Bykov V.G. Development of sliding regimes in faults and slow strain waves. *Physical Mesomechanics.* 2019; 22(4):39-46. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-14004. EDN OHCQWY.(rus.).

55. Kuznetsov S.V., Terentjeva E.O. Planar internal Lamb problem: Waves in the epicentral zone of a vertical power source. *Acoustical Physics*. 2015; 61(3):356-367. DOI: 10.1134/s1063771015030112

56. Truesdell C. General and exact theory of waves in finite elastic strain. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1961; 8(1):263-296. DOI: 10.1007/bf00277444

Received June 10, 2025.
Adopted in revised form on July 1, 2025.
Approved for publication on October 8, 2025.

BIONOTES: **Sergey V. Kuznecov** — Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Acting Head 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; Scopus: 7202573564, ResearcherID: H-9448-2013, ORCID: 0000-0001-9426-0791; KuznetsovSV@mgsu.ru;

Sergey A. Kalinovsky — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 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; ID RSCI: 670367, Scopus: 57202802927, ResearcherID: AAR-1204-2021, ORCID: 0000-0001-6780-5215; KalinovskiiSA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:
Sergey V. Kuznecov — scientific guidance, research concept, development of methodology, writing the source text, final conclusions.
Sergey A. Kalinovsky — processing of the material, revision of the text, design of the article.
The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.154
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1691-1706

Инженерный метод определения осадки сваи с учетом допускаемой упругопластической работы грунта

Андрей Григорьевич Алексеев[1,2], Степан Георгиевич Безволев[3]
[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
[2] Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия;
[3] Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Научно-исследовательского центра «Строительство» (НИИОСП НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Показана целесообразность повышения точности и общности упрощенных решений для расчета осадки одиночных свай. Такие решения рекомендованы строительными нормами РФ для оценки величины проектной осадки свай, а также применяются для определения параметров контактных моделей при разработке конструкций свайных фундаментов. Отмечены ограничения существующих методов расчета одиночных свай.

Материалы и методы. Выполнены анализ и усовершенствование инженерной методики, в которых осадка одиночной сваи рассчитывается по упругим зависимостям по данным нормативной оценки нагрузки, воспринимаемой трением грунта о боковую поверхность ствола сваи, и нагрузки, передаваемой на грунт пятой сваи при рабочей нагрузке на сваю. Соотношение этих нагрузок отражает влияние упругопластической работы грунта в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки.

Результаты. Рассмотрены альтернативные инженерные решения задачи определения осадки сваи с учетом практической упругопластической работы грунта в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки. Разработано уточненное решение этой задачи, обеспечивающее более практичные результаты расчетов осадок свай, отвечающие концепциям и эмпирической базе действующих норм проектирования РФ. Представлены сопоставления результатов расчетов различными методами. Разработанное ранее аналитическое упругое и обоснованное в данной статье упругопластическое инженерное решения описывают трансформацию начального линейного сопротивления грунта к его упругопластическому сопротивлению при допускаемой на сваю расчетной нагрузке. Совместное применение этих решений обеспечивает разработку надежной и рациональной конструкции свайного фундамента посредством расчета по нелинейной контактной модели.

Выводы. Разработанное инженерное решение для определения осадки сваи с учетом практической упругопластической работы грунта следует использовать для проектной оценки осадки сваи от допускаемой на нее рабочей нагрузки и параметров линейных и нелинейных контактных моделей. Адекватность разработанного решения обеспечивается применением хорошо зарекомендовавшим себя в геотехнической практике учетом концентрации напряжений и деформаций в примыкающих к месту передачи нагрузки областях грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свая, допускаемая нагрузка на сваю, осадка сваи, инженерное решение, контактная модель, строительные нормы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Алексеев А.Г., Безволев С.Г.* Инженерный метод определения осадки сваи с учетом допускаемой упругопластической работы грунта // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1691–1706. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1691-1706

Автор, ответственный за переписку: Степан Георгиевич Безволев, compgeo@ya.ru.

Engineering method for determining pile settlement taking into account the permissible elastic-plastic behaviour of the soil

Andrej G. Alekseev[1,2], Stepan G. Bezvolev[3]
[1] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;
[2] Research Centre "Construction"; Moscow, Russian Federation;
[3] Research, Research, Design, Survey, and Engineering Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevnov of the Research Centre "Construction"; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The feasibility of increasing the accuracy and generality of simplified solutions for calculating the settlement of single piles is shown. Such solutions are recommended by the building codes of the Russian Federation for assessing

© А.Г. Алексеев, С.Г. Безволев, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

the design settlement of piles and are also used to determine the parameters of contact models when developing pile foundation structures. The limitations of existing methods for calculating single piles are noted.
Materials and methods. An analysis was carried out and an improvement was developed for an engineering methodology in which the settlement of a single pile is calculated using elastic dependencies, according to the data of a normative assessment of the load perceived by the friction of the soil against the lateral surface of the pile shaft, and the load transferred to the soil by the fifth pile under the working load on the pile. The ratio of these loads reflects the influence of the elastic-plastic work of the soil, in the range of the design load allowed on the pile.
Results. Based on the results of the presented studies, the field of application of the analytical calculation method based on the approximation of the pile behaviour in an elastic half-space is indicated — assessment of its initial linear resistance. Alternative engineering solutions to the problem of determining the pile settlement are considered taking into account the practical elastic-plastic work of the soil, in the range of the permissible design load on the pile. A refined solution to this problem has been developed, providing more practical results of pile settlement calculations that meet the concepts and empirical basis of the current design standards of the Russian Federation. Comparisons of the calculation results by various methods are presented. The previously developed analytical elastic and elastic-plastic engineering solutions substantiated in this paper' describe the transformation of the initial linear resistance of the soil to its elastic-plastic resistance under the permissible design load on the pile. The combined application of these solutions ensures the development of a reliable and rational pile foundation design through calculation using a nonlinear contact model.
Conclusions. Simplified solutions for calculating the settlement of single piles are in demand in construction practice; increasing the accuracy and generality of such solutions ensures the determination of adequate parameters of contact models for developing reliable and rational designs of pile foundations. The developed engineering solution for determining pile settlement taking into account the practical elastic-plastic behaviour of the soil is advisable to use for the design assessment of pile settlement from the permissible working load on it and for determining the parameters of linear and nonlinear contact models. The adequacy of the developed solution is ensured by the use of a well-proven in geotechnical practice consideration of stress and strain concentration in soil areas adjacent to the load transfer point.

KEYWORDS: pile, permissible pile load, pile settlement, engineering solution, contact model, building codes

FOR CITATION: Alekseev A.G., Bezvolev S.G. Engineering method for determining pile settlement taking into account the permissible elastic-plastic behaviour of the soil. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1691-1706. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1691-1706 (rus.).

Corresponding author: Stepan G. Bezvolev, compgeo@ya.ru.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечено авторами в исследовании [1], изучению взаимодействия свайного фундамента с грунтовым массивом посвящено огромное количество научных работ. Разработаны различные аналитические и численные решения для прогноза несущей способности и осадки свай. Наиболее общий учет совместной работы свай и нелинейной работы грунта возможен лишь численным методом в пространственной постановке. Для этого численная модель должна обладать надлежащими конфигурацией разбивки и габаритами расчетной области, обеспечивающими приемлемость приближенности условий на ее внешних границах. В результате пространственный расчет, особенно при неоднородном грунтовом основании и учете нелинейности, требует использования высокопроизводительных ЭВМ и характеризуется большой трудоемкостью со слабо контролируемой погрешностью в зависимости от количества и качества исходных данных. При этом даже современные модели нелинейного деформирования грунтов под нагрузкой не позволяют учесть все аспекты их работы, прежде всего в составе свайного основания и при сложном нагружении. С другой стороны, например, для моделей, учитывающих наряду с упругим и упрочняющимся деформированием грунтов идеальную пластичность и/или разупрочнение, отсутствуют удовлетворительные численные методики.

В этой ситуации востребовано применение методов, сочетающих достаточно простые и общие расчетные формулы с эмпирическими правилами, обеспечивающими адекватность проектным задачам этих формул и методик определения величин входящих в них параметров. Так, действующие нормы РФ по проектированию свайных фундаментов СП 24[1] для контроля результатов, получаемых численными методами, предписывают применение упрощенных методик оценки таких ключевых показателей, как допускаемая нагрузка на сваю и ее осадка. Наиболее отработаны нормативные методы определения несущей способности одиночных свай по грунту. Установившейся практикой является обязательное применение данных стандартных полевых испытаний грунтов зондированием и контрольным статическим нагружением свай. Эти методы дают возможность надежно установить допускаемую (расчетную, рабочую) нагрузку на одиночную сваю P.

Менее разработаны и неадекватны нормативной допускаемой нагрузке на сваю существующие методы расчета осадки одиночной сваи. Они, как правило, базируются на частных решениях, которые требуют усовершенствования из-за узкой области применимости и несоответствия процессу работы сваи во всем диапазоне допускаемой на нее нагрузки.

Между тем адекватная расчетная зависимость для осадки одиночной сваи весьма востребована, так как на ее основе строятся практические решения по расчету осадок групп свай и контактные модели,

[1] СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. СНиП 2.02.03-85 // НИИОСП им. Н.М. Герсеванова ОА «НИЦ "Строительство"» Минстроя России. М. : Российский институт стандартизации, 2022. 82 с.

в том числе наиболее точные и гибкие нелинейные, для разработки конструкций свайных фундаментов [2]. Поэтому повышение точности и общности упрощенной методики расчета осадки одиночной сваи имеет большое практическое значение.

В исследовании [1] авторами был представлен анализ представленных в нормах и справочных пособиях по проектированию свайных фундаментов СП 24 [2–5], упрощенных методов расчета осадки одиночной и групповых свай, полностью базирующихся на аппроксимации решений теории упругости. С учетом упругой основы для использования этих методов необходимо ограничивать расчетную нагрузку на сваю величиной, в диапазоне которой деформации грунта практически линейны. Анализ выявил ряд различий результатов этих методов в зависимости от параметров свай и грунтового основания. В итоге выполненных сопоставлений и анализа с целью применения для адекватной оценки начального линейного сопротивления сваи была разработана актуализация так называемого телескопического аналитического решения [5–9].

В частности, для свай в двухслойном основании, практичная модель неоднородности которого представлена на рис. 1, в работе [1] актуализировано следующее наиболее общее аналитическое выражение:

$$I_{sd} = \frac{sG_1 d}{P} = \psi_d \frac{\mu EA + K_b \tanh(\mu L)}{K_b + \mu EA \tanh(\mu L)}, \qquad (1)$$

где $\psi_d = \frac{G_1 d}{\mu EA}$; $K_b = \frac{E_b d \eta_s}{1 - \nu_b^2}$; $\mu = \sqrt{\frac{2\pi G_1}{\varsigma \alpha_s EA}}$; $\xi = \log(r_m/r_0)$; $r_0 = d/2$; L — рабочая (взаимодействующая с грунтом) длина сваи; d — диаметр ствола сваи (для некруглых сечений, эквивалентный по периметру u сечения $d = u/\pi$); α_s — коэффициент условий деформирования грунта у боковой поверхности сваи; η_s — коэффициент размеров и условий работы пяты (уширения) сваи; G, E и ν — модули сдвига Юнга (одноосного сжатия) и коэффициент Пуассона грунта; EA — продольная жесткость ствола сваи (для круглого сплошного сечения $EA = E_p \pi d^2/4$, E_p — модуль Юнга материала ствола); r_m — расчетный радиус, на котором осадки основания становятся пренебрежимо малыми, определяемый по модифицированной формуле [1]:

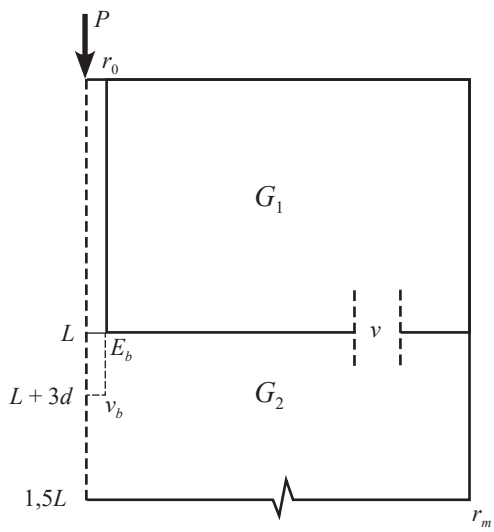


Рис. 1. Расчетное двухслойное основание актуализированной телескопической модели

Fig. 1. Calculated two-layer foundation of the updated telescopic model

$$r_m = 2{,}5(1 - \nu)G_1/G_2 L + 3{,}1[d - \min(d, 0{,}1L)]. \qquad (2)$$

В выражении (2) первое слагаемое корректирует второе для коротких ($L/d < 10$) свай, что обеспечивает сближение результатов расчетом по телескопической модели с данными численных упругих расчетов. За счет этого решение (1) может использоваться для моделирования группы свай методом эквивалентной одиночной сваи [7], у которой, как правило, $L/d << 10$.

Отметим, что в публикации [10] предложена громоздкая модификация выражения (1), предназначенная для более точного учета типового случая, когда пята сваи существенно заглубляется в более жесткий нижний слой. Однако проведенные в рамках настоящей работы сопоставительные расчеты показали, что предложенные [8] уточнения практически совпадают с простейшим способом [1, 5–7] осреднения модуля сдвига грунта в пределах длины сваи, т.е. использования схематизации рис. 1.

Коэффициент α_s условий работы боковой поверхности сваи, в частности, обусловленных влиянием технологического способа ее устройства, неоднородности окружающего грунта и характера контактной поверхности, в первом приближении принимается по зависимости:

$$\alpha_s = \alpha_0 = \gamma_c \gamma_{cf}, \qquad (3)$$

где γ_c и γ_{cf} — нормативные коэффициенты СП 24 (см. п. 7.2.6 и табл. 7.4 или 7.6).

Для учета способа устройства сваи и вида грунта принимается $\eta_0 = \gamma_c \gamma_{cR}$, где γ_c и γ_{cR} — нормативные коэффициенты СП 24 (см. п. 7.2.6 и табл. 7.4):

$$\eta_s = \prod_{i=0}^{4} \eta_i = \eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4, \qquad (4)$$

где η_i — коэффициент влияния i-го фактора, определяющего условия работы пяты.

Для учета способа устройства сваи и вида грунта принимается $\eta_0 = \gamma_c \gamma_{cR}$, где γ_c и γ_{cR} — нормативные коэффициенты СП 24 (табл. 7.4 или п. 7.2.6).

Отличие диаметра d_b (площади) пяты сваи от диаметра d ее ствола учитывает зависимость $\eta_1 = d_b/d$. При $d_b = d$ и выдергивающей нагрузке или при вдавливании и присутствии под пятой рыхлого шлама принимают $\eta_1 = 0$.

Представленные в таблице величины коэффициента η_2 для учета отличия прямоугольного сечения пяты, например бареттной сваи, от соот-

Коэффициент η_2 влияния прямоугольной формы пяты в зависимости от отношения сторон *l*/*b*

Coefficient η_2 of the influence of the rectangular shape of the heel depending on the ratio of sides *l*/*b*

l/*b*	1 (квадрат) 1 (square)	2 (прямоугольник) 2 (rectangle)	3“	4“	5“
η_2	0,99	0,97	0,94	0,91	0,87

ветствующего $\eta_2 = 1$ круга получены по данным Ф. Шлейхера [9].

Учет наличия на некоторой глубине под пятой жесткого подстилания выполняется по данным решений теории упругости для штампа на упругом слое [10] $\eta_3 = 1 + 0{,}65d_b/H_c$, где H_c — толщина упругого слоя под пятой.

Согласно результатам исследования [1], учет обусловленного в основном передачей нагрузки от боковой поверхности сваи влияния заглубления пяты в упругое полупространство в запас надежности расчета осадки обеспечивает величина $\eta_4 = 0{,}5$.

При $\alpha_s = 1$, $\eta_s = \eta_1$ и $G_2 = G_1$ решение (1) совпадает с выведенным в труде [6]. При $G_2 >> G_1$ решение (1) соответствует разработанным в МГСУ аналитическим решениям осесимметричной краевой задачи о взаимодействии одиночной сваи с окружающим и жестким подстилающим грунтами ограниченного простирания [11]. Для такой ячейки ограниченных размеров существуют и решения, разработанные для расчетов групповой сваи свайного фундамента при высоком и низком ростверке [12]. В этом случае конкретный диаметр расчетной ячейки определен симметрией и геометрическими параметрами (расстоянием между сваями) [13, 14].

Существенная проблема и погрешность использования основной массы численных (МКЭ и прочее) решений [4, 15–21] для расчета свай обусловлены произволом в выборе размеров расчетной области, в частности толщины H_c подстилающей пяту сваи ее части и радиуса r_m (см. рис. 1). Подобные величины указаны в рекомендациях СП 24 для численного моделирования графика нагрузка — осадка одиночной сваи (п. 7.7.13: $r_m \geq 5d$, $H_c \geq 3d$, где d — диаметр поперечного сечения сваи). Согласно СНиП II-Б.2[2] свая считалась одиночной при расстоянии до ближайшей сваи $r_m \geq 3d$. По данным обработки опытов и численных расчетов по упругопластической модели HSS Плаксис[3] радиус зоны активных деформаций вокруг одиночной сваи в дисперсных плотных грунтах составил $4d$ [22]. В практике проектирования, особенно в мостовом строительстве, широко применяется нормативная (СНиП II-Б.5[4]) схема условного фундамента ($r_m = r_{quf} = d/2 + L\tan(\varphi_1/4)$, φ_1 — осредненный в пределах L угол внутреннего трения грунтов), H_c — нормативная глубина сжимаемой толщи под условным фундаментом СП 24 и СП 22[5]. Эта схема качественно обоснована установленным В.Н. Голубковым в 1961 г. [23] механизмом формирования ограниченной зоны деформации вокруг одиночной сваи или свайной группы. Величины СНиП II-Б.2, СНиП II-Б.5 и СП 24 явно не отвечают отмеченным выше требованиям к граничным условиям пространственной численной модели. Таким образом, моделирование по п. 7.7.13 СП 24 является приближенным инженерным методом, в рамках которого необходима полная регламентация выбора r_m и H_c, а также модели грунта и ее параметров.

Альтернативный описанным методам подход предложен в разделе 4.6 [24]. В частности, осадка одиночной сваи рассчитывается по данным проектной оценки нагрузки P_1, воспринимаемой трением грунта о боковую поверхность ствола сваи, и нагрузки P_b, передаваемой на грунт пятой сваи при рабочей нагрузке на сваю P. Методы определения этих величин, учитывающие разнообразные виды грунтов и типы свай, всесторонне исследованы [25, 26]. Ограниченной применимости частные рекомендации по оценке величин P_b и P_1 и исчерпывающие указания по определению P для проектирования в РФ даны в СП 24. Как отмечалось выше, установившейся практикой является применение данных стандартных полевых испытаний грунтов зондированием и контрольных статическим нагружением свай.

По проектным величинам P_b и P_1 [26] осадку сваи s рассчитывают как сумму осадки ее пяты s_b от P_b и сжатия ствола s_c от P_1. В публикации [27] от P_1 дополнительно учитывается осадка s_1 пяты сваи. В работе [22] альтернативно пренебрегают работой грунта на сжатие под нижним концом сваи, т.е. принимают $P = P_1$ ($P_b = 0$) и считают осадку сваи s обусловленной в основном сдвиговыми деформациями окружающего грунтового массива, определяя ее от полной нагрузки с учетом нелинейности сдвиговых деформаций грунта. Видимо, этот способ пригоден при величинах P, при которых не достигается составляющая обычно порядка 10–20 мм, так называемая сдвиговая осадка, и пята сваи не вступает в работу.

По СНиП II-Б.5, пренебрегая составляющей s_c и учитывая неопределенность распределения P на P_b и P_1, осадка $s = s_b + s_1$ приближенно опреде-

[2] СНиП II-Б.2-62. Свайные фундаменты из забивных свай. Нормы проектирования // Госстрой СССР. М., 1961. 131 с.

[3] PLAXIS 2D-v.9 Finite Elements Code for Soil and Rock Analysis. User Manual. Rotterdam : Balkema, 2008.

[4] СНиП II-Б.5-67. Свайные фундаменты. Нормы проектирования // Госстрой СССР. М., 1968. 31 с.

[5] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* // НИИОСП им. Н.М. Герсеванова ОА «НИЦ “Строительство”» Минстроя России. М. : Стандартинформ, 2020. 204 с.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

лялась по упомянутой выше схеме условного фундамента, равномерно распределяющего через его подошву на грунт суммарную нагрузку $P = P_b + P_1$. Кроме отсутствия обоснования способа определения r_{quf}, в методике СНиП II-Б.5 пренебрегаются концентрация и большие градиенты напряжений в грунте в зоне пяты, что затрудняет адекватный учет упругопластических эффектов в этой важной области. В то же время при условии адекватности используемых давлений от нагрузок P_b и P_1 рассмотрение их непосредственного действия на грунт упрощает расчеты деформаций грунта с учетом его практической упругопластической работы в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки.

В настоящей статье представлены результаты анализа применения при проектировании свайных фундаментов упрощенных методов расчета осадки одиночной сваи СНиП II-Б.5 [24, 27] и разработан уточняющий вариант, обеспечивающий повышение рациональности метода и согласованность результатов расчета, с концепциями действующих в РФ нормативных документов. В частности, для задачи определения осадки сваи с учетом ограниченной упругопластической работы грунта в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки разработано уточнение упрощенного метода [27], обеспечивающее более практичные результаты расчетов, отвечающие концепциям и надежной эмпирической базе действующих СП 22 и СП 24. Методика их применения при проектных расчетах сформулирована с учетом многолетних опытных данных и практики проектирования. Разработанное ранее аналитическое упругое решение [1] и обоснованное в данной статье упругопластическое инженерное решение рекомендовано использовать для установления параметров расчетных зависимостей нагрузка – осадка сваи. Эти зависимости описывают трансформацию начального линейного сопротивления грунта к фактическому, соответствующему упругопластическому состоянию вмещающего сваи грунтового массива. Их применение обеспечивает разработку надежной и рациональной конструкции свайного фундамента посредством расчета по нелинейной контактной модели [2]. Инженеры-геотехники могут использовать разработанные рекомендации и актуальные решения при проектировании свайных фундаментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для актуализации в настоящей статье упрощенного метода расчета осадки одиночной сваи выбраны инженерные решения СНиП II-Б.5 [24, 27].

1. Характеристика методов расчета осадки одиночной сваи [25, 27]

Как отмечалось выше [24], осадка s одиночной сваи от передаваемой на ее голову вертикальной нагрузки P рассчитывается, считая известными нагрузку P_1, воспринимаемую трением грунта о боковую поверхность ствола сваи, и нагрузку $P_b = P - P_1$, передаваемую на грунт через пяту сваи. Тогда s можно определить как сумму упругого укорочения ствола s_c и сжатия грунта под основанием s_b. Для расчета s_c используется формула сопротивления материалов в предположении передачи нагрузки на грунт равномерно вниз по свае с линейным понижением продольной силы в стволе сваи от P до P_b:

$$s_c = \frac{(P + P_b)}{2EA} L_s, \qquad (5)$$

где L_s — общая (с оголовком) длина сваи; EA — продольная жесткость ствола сваи (см. пояснения к выражению (1)).

Для расчета s_b используется форма [9] решения Буссинеска [28] для круглого гладкого штампа на поверхности упругого полупространства (УПП), дополненная [24] понижающим коэффициентом $I_p = 0{,}5$ для учета влияния заглубления пяты в частном случае ($\nu \le 0{,}25$, $L/d \ge 5$ и рассчитанной при $I_p = 1$ $s_b \ge 0{,}5P_b/dE_b$):

$$s_b = \frac{P_b(1 - \nu_b^2)I_p}{d_b E_b}, \qquad (6)$$

где d_b — диаметр пяты сваи; E_b и ν_b — модуль деформации и коэффициент Пуассона ее основания.

В представленной постановке [24] при расчете полной осадки сваи s фактически не учитывается влияние передаваемой на грунт боковой поверхностью сваи нагрузки $P_1 = P - P_b$ на деформации вмещающего сваю массива, в частности расположенного ниже уровня пяты сваи. При этом частично учитывается влияющая противоположным образом работа расположенного выше уровня пяты сваи грунта на растяжение от передаваемой пятой нагрузки посредством коэффициента I_p. Он представляет собой по смыслу величину, обратную к коэффициенту η_4 формулы (1c). Разница в этих коэффициентах очевидным образом демонстрирует результат пренебрежения отмеченным влиянием нагрузки P_1, а также завышение распределительной способности и сопротивления растяжению грунтового массива (см. п. 1.5).

В публикации [27] введенные [24] упругие составляющие осадки s_c и s_b предлагается суммировать с дополнительной составляющей осадки пяты сваи s_1 от нагрузки $P_1 = P - P_b$, передаваемой на грунт боковой поверхностью сваи. Согласно выводам [27], по данным расчетов МКЭ передаваемая боковой поверхностью сваи нагрузка P_1 концентрируется в виде вертикальных сжимающих напряжений на уровне пяты сваи (рассматриваются сваи без уширения, когда $d_b = d$) в узком кольце внешним радиусом $2{,}5d$. Тогда, пренебрегая действующими в уровне пяты касательными напряжениями, для определения s_1 достаточно просто по решению Бус-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

синеска [28] может использоваться зависимость для осадки под совпадающем с центром пяты сваи центром равномерно распределенной по кольцу шириной 2*d* нагрузки:

$$s_1 = \frac{(1-\nu_b^2)P_1}{1{,}5\pi dE_b}. \qquad (7)$$

Помимо компоненты (7) [27] от передаваемой на окружающий сваю грунт нагрузки P_1, дополнительно рассчитывают компоненту осадки в виде «деформации сдвига в пределах линейного деформирования» по формуле:

$$s_f = \frac{P_1}{\pi dLG_1}. \qquad (8)$$

Считать деформацию (4а) дополнительной компонентой осадки сваи представляется некорректным: 1) деформация (8) безразмерна; 2) в этой сугубо упругой схеме грунт и свая сцеплены. Поэтому сопротивление грунта сдвигу сказалось на сжатии ее ствола и эти сдвиговые деформации уже учтены при расчете по формуле (5) компоненты осадки за счет сжатия ствола.

Суммарно выражения (6) и (7) [27] дают осадку пяты сваи ($d_b = d$) по следующей расчетной формуле:

$$s_b = \frac{(1-\nu_b^2)}{dE_b}\left(P_b + P_1/\pi/1{,}5\right). \qquad (9)$$

В подходе [27], учитывая влияние нагрузки P_1, не рассматривается вопрос учета условий работы пяты сваи, подобного применению α_s и η_s в формуле (1) или I_p в выражении (3).

Далее изложим развивающую и уточняющие подходы СНиП II-Б.5 [24, 27] методологию.

2. Развитие методов СНиП II-Б.5 [24, 27]

Соответствующая формуле (6) линейная эпюра продольной силы предполагает равномерно распределенные по длине сваи касательные напряжения τ. Однако большинство исследователей считают основным линейное возрастание τ с глубиной [21, 29]. Для этого случая (треугольной эпюры τ(*z*)) получим:

$$s_c = \frac{(2P + P_b)}{3EA} L_s. \qquad (10)$$

Не представляет трудностей расчет s_c и при произвольной зависимости τ(*z*), например непосредственное численное интегрирование нормативных (СП 24) табличных зависимостей $\tau_u(z) = f(z)$, или подсчитанных по стандартным (Кулона – Мора) прочностным характеристикам от бытовых напряжений в грунтовом массиве $\tau_u(z) = c + \xi_0\sigma_g\tan\varphi$ (где *c* и φ — удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта; ξ_0 — коэффициент начального (бытового) бокового давления, принимаемый в этом случае в запас надежности равным коэффициенту бокового давления при компрессии ξ_c, определяемому по носящей имя Яки эмпирической зависимости $\xi_c = 1 - \sin\varphi$); σ_g — начальное (бытовое от собственного веса грунтов) вертикальное напряжение.

С учетом этого наиболее общая расчетная формула для s_c, учитывающая в том числе сжатие расположенного выше уровня земли оголовка сваи, имеет вид:

$$s_c = \frac{\int_0^{L_s}\left[P - \pi d\int_0^{L}\tau_u(z)dz\right]dz}{EA} L_s. \qquad (11)$$

Однако большого значения уточненное по формуле (11) определение s_c не имеет, поскольку из-за большой жесткости ствола обычных ж/б или стальных висячих свай этот компонент их осадки на порядок меньше осадки пяты сваи.

Для уточнения расчета упругой осадки s_b на основе подхода [24] можно использовать разработанную в работе [1] форму решения Бус*α*синеска [28] для круглого гладкого штампа на упругом полупространстве с использованием определяемого по зависимости (1с) коэффициента h_s условий работы заглубленной пяты сваи:

$$s_b = \frac{P_b}{K_b} = \frac{P_b(1-\nu_b^2)}{E_b d\eta_s}. \qquad (12)$$

Далее изложим альтернативный способ, уточняющий методику [27] определения величины s_b с выделением составляющей нагрузки P_1, передаваемой на грунтовый массив боковой поверхностью сваи.

Аналитические формулы [30] позволяют осуществить оценку и уточнение выводов [27] о закономерности распределения вертикальных нормальных напряжений вокруг пяты сваи при характерных для ограниченной упругопластической работы грунтового массива нормативных величинах $k_P = P_b/P$. Выбор варианта [30] интегрирования формулы Буссинеска [28], а не [31] формулы Миндлина [32], обусловлен тем, что даже при ограниченной упругопластической работе грунтового массива упругие решения по Миндлину становятся неприменимыми из-за завышения распределительной способности и работы грунта на растяжение. При этом решения по Буссинеску, в частности для расчета по модели УПП вертикальных сжимающих напряжений, значительно лучше соответствуют данным экспериментов и расчетов по современным упругопластическим моделям [33]. Фактически на сегодняшний день отсутствует упругопластическая модель, которая бы существенно лучше описывала наблюдаемую в опытах концентрацию напряжений в примыкающих к месту передачи нагрузки областях грунта.

Представленное на рис. 2 сопоставление, выполненное с применением формул [30], подтверж-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

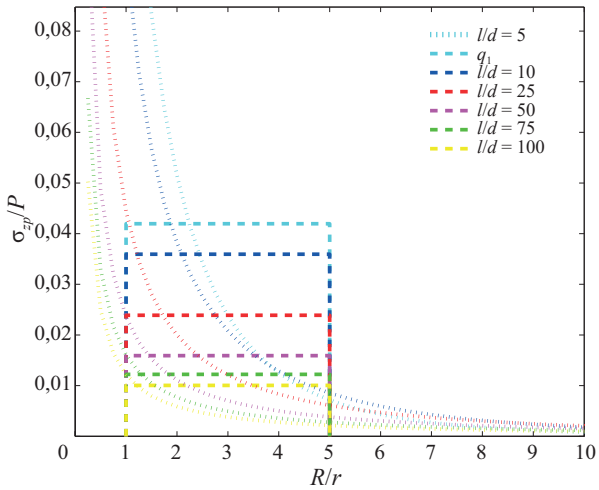


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений σ_{zp} в упругом массиве вокруг пяты сваи

Fig. 2. Distribution of vertical stresses σ_{zp} in an elastic mass around the pile heel

дает высокую степень такой концентрации в кольцевой зоне шириной $2d$ (с внешним радиусом $a_1 = 2{,}5d$), особенно для свай с относительной длиной до $l/d = 50$.

При $L/d > 50$ доля нагрузки за пределами расчетного кольца согласно исследованию [30] становится сопоставимой по величине с остальной частью нагрузки. Как отмечалось выше, результаты упругопластических расчетов и данные экспериментов свидетельствуют о большей концентрации вертикальных напряжений вблизи сваи, чем в упругих прогнозах, в частности по решениям [30, 31]. Вокруг одиночной сваи с $L/d \le 100$ концентрацию в кольцевой зоне не менее 80 % нагрузки обеспечивает внешний радиус кольцевой зоны a_1, определяемый по приближенной зависимости:

$$a_1 = k_1 d = [0{,}8\log(L/d/5) + 2{,}5]d. \qquad (13)$$

В российской практике проектирования фундаментов учет концентрации напряжений в примыкающих к месту передачи нагрузки областях грунта на настоящем этапе выполняется хорошо зарекомендовавшим себя методом расчета на основе инженерной модели осадок фундамента мелкого заложения, а также заглубленного условного фундамента СП 24, в частности способом СП 22 ограничения сжимаемой толщи грунтового основания H_c, в пределах которой под подошвой фундамента интегрируется расчетное сжатие от вертикальных нормальных напряжений σ_{zq}. Способ основан на данных экспериментов и натурных наблюдений. Как впервые показано в публикации [34], распределение вертикальных перемещений грунта по глубине в принципе отличается от расчетного по теории УПП. В то же время распределение сонаправленных нагрузке вертикальных напряжений, особенно в основаниях с постепенно возрастающей с глубиной жесткостью или при слоистости E_1/E_2 порядка 0,5–5, хорошо качественно и близко количественно соответствует рассчитанной по УПП [33]. Главная часть суммарного сжатия основания, т.е. осадки, концентрируется в верхней части основания фундамента толщиной $H_0 \approx$ $\approx b/2$ (b — ширина фундамента). С ростом нагрузки толщина этой зоны может возрастать. Для обеспечения сходимости с опытными данными в СП 22 нижнюю границу сжимаемой толщи определяют как глубину $Z_c \ge H_0$, на которой рассчитанное по УПП вертикальное напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{zq} \le 50$ % (для грунтов с $E > 7$ МПа) бытового давления (эффективного напряжения в грунте до начала строительства) σ_{zg}. При этом деформации сжатия рассчитываются по напряжениям σ_{zq} по компрессионной (одометрической) схеме с коэффициентом Пуассона $\nu \approx 0{,}25$.

Применительно к рассматриваемому случаю осадки пяты одиночной сваи, уточненная нормативная (СП 22) расчетная схема представлена на рис. 3. На схеме приведен способ интегрирования в пределах сжимаемой толщи H_c деформаций, подсчитанных по вертикальным напряжениям от действующих в уровне пяты равномерно распределенных круговой нагрузки $q_b = P_b/A_b$ ($A_b = \pi d^2/4$ — площадь пяты сваи) и кольцевой $q_1 = 4P_1/\pi/(a_1 - d/2)^2$ (a_1 — внешний радиус нагрузки q_1).

Таким образом, расчет осуществляется аналогично расчету по модели условного свайного фундамента СНиП II-Б.5 и СП 24 лишь с изменением правила определения его размера и распределения нагрузки в его пределах. В варианте [27] с равномерным распределением нагрузки в кольце с внешним радиусом $a_1 = 2{,}5d$ суммарные дополнительные от нагрузок q_b и q_1 напряжения σ_z по вертикали под центром пяты определяются по решению для равномерно распределенной по площади круга нагрузки, полученного в работе [35] интегрированием формулы Буссинеска [28] для сосредоточенной силы:

$$\sigma_z = (q_b - q_1)\alpha(a_b, z) + q_1\alpha(a_1, z), \qquad (14)$$

где z — вертикальная координата (глубина), отсчитываемая от уровня нагрузки q (пяты сваи); $a_b = 0{,}5d$ — радиус пяты (нагрузки q_b); $a_1 = 2{,}5d$ — внешний радиус кольцевой нагрузки q_1; α — коэффициент рассеивания напряжений, определяемый по формуле (или таблицам СП 22):

$$\alpha(a, z) = 1 - \left[\frac{z^2}{z^2 + a^2}\right]^{3/2}. \qquad (15)$$

В исследовании [36] представлена достаточно просто получаемая интегрированием решения Миндлина [32] для сосредоточенной силы, приложенной внутри УПП, зависимость распределения вертикальных напряжений под центром заглубленной круговой нагрузки:

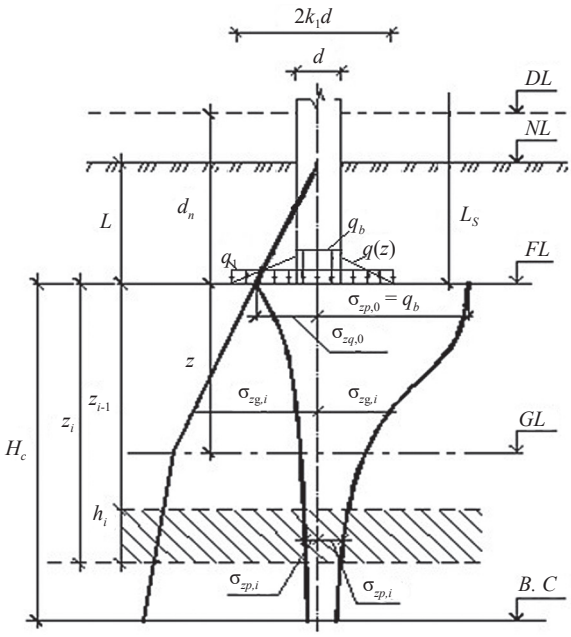


Рис. 3. Схема к определению глубины H_c, расчета и интегрирования вертикальных деформаций по эпюрам вертикальных напряжений в основании под центром пяты сваи: *DL* — отметка планировки; *NL* — отметка поверхности природного рельефа; *GL* — граница разнородных по удельному весу и сжимаемости ИГЭ; *FL* — отметка подошвы пяты сваи; *B. C* — нижняя граница сжимаемой толщи; L_s — общая длина ствола сваи; *L* — рабочая длина сваи (совпадает с уровнем заложения пяты от уровня планировки); d_n — глубина заложения пяты сваи от уровня поверхности природного рельефа (от которой отсчитываются бытовые напряжения); *d* — диаметр пяты сваи; q_b и q_1 — среднее давление под подошвой пяты и в расчетной кольцевой зоне шириной $2d$; σ_{zg} и $\sigma_{zg,0}$ — вертикальное напряжение от собственного веса грунта на глубине *z* от подошвы фундамента и на уровне подошвы; σ_{zp} и $\sigma_{zp,0}$ — вертикальное напряжение от внешней нагрузки на глубине *z* от подошвы пяты и на уровне подошвы; $\sigma_{zg,i}$ — вертикальное напряжение от собственного веса вынутого в котловане грунта в середине *i*-го слоя на глубине *z* от подошвы пяты; H_c — глубина сжимаемой толщи

Fig. 3. Scheme for determining the depth H_c, calculating and integrating vertical deformations using vertical stress diagrams in the base under the centre of the pile heel: *DL* is the planning elevation; *NL* is the natural relief surface elevation; *GL* is the boundary of IGE of different specific gravity and compressibility; *FL* is the elevation of the pile heel base; *B. C* is the lower boundary of the compressible thickness; L_s is the total length of the pile shaft; *L* is the working length of the pile (coincides with the level of the heel from the planning level); d_n is the depth of the pile heel from the level of the natural relief surface (from which household stresses are measured); *d* is the diameter of the pile heel; q_b and q_1 are the average pressure under the heel base and in the calculated annular zone of width $2d$; σ_{zg} and $\sigma_{zg,0}$ are the vertical stress due to the soil's own weight at a depth *z* from the foundation base and at the base level; σ_{zp} and $\sigma_{zp,0}$ are the vertical stress due to the external load at a depth z from the heel base and at the base level; $\sigma_{zg,i}$ is the vertical stress due to the soil's own weight excavated from the pit in the middle of the *i*-th layer at a depth *z* from the heel base; H_c is the depth of the compressible layer

$$\sigma_z = q\alpha_m = q\frac{\alpha_{mc}}{4(1-\nu)};\ \alpha_{mc} = 1-\frac{(z-c)^3}{\left[\rho^2+(z-c)^2\right]^{3/2}}+$$
$$+\left\{1-\left[\frac{z-c}{\sqrt{\rho^2+(z-c)^2}}\right]^3\right\}\frac{(3-4\nu)z(z+c)-z(5z-c)}{(z+c)^3}+$$
$$+(1-2\nu)\left[1-\frac{z-c}{z+c}+\frac{z-c}{\sqrt{\rho^2+(z+c)^2}}-\frac{z-c}{\sqrt{\rho^2+(z-c)^2}}\right]+$$
$$+\frac{6zc}{(z+c)^2}\left\{1-\left[\frac{z+c}{\sqrt{\rho^2+(z+c)^2}}\right]^5\right\}, \quad (16)$$

где *z* — глубина, отсчитываемая от поверхности УПП (головы сваи); *c* — заглубление круговой нагрузки *q* (пяты сваи).

С учетом равномерной кольцевой нагрузки q_1 расчет по этой зависимости ведется суперпозицией по формуле (14) с заменой α на α_m. Однако в рассматриваемом подходе, учитывающем ограниченную упругопластическую работу грунта, целесообразность применения схемы Миндлина работы упругого полупространства определения осадки требует обоснования.

Для снижения отмеченной выше погрешности «прямоугольного» приближения (см. рис. 3) и обеспечения адекватной точности, особенно для свай с $l/d > 50$, целесообразно принять треугольный характер распределение нагрузки P_1 в ее расчетном кольце с внешним радиусом $r = a_1$, определяемым по зависимости (13). Такое решение получим на основе решения Буссинеска [28] для сосредоточенной силы, выполнив интегрирование напряжений от элементарной нагрузки $dP = \rho d\rho d\varphi$ сначала по углу φ, а затем по радиусу ρ:

$$\sigma_{zt} = \frac{3q_r z^3}{2\pi}\int_r^R\int_0^{2\pi}\frac{(R-\rho)\rho d\rho d\varphi}{(R-r)\sqrt{(\rho^2+z^2)^5}} =$$
$$=\frac{3q_r z^3}{R-r}\left[R\int_r^R\frac{\rho d\rho}{\sqrt{(\rho^2+z^2)^5}}-\int_r^R\frac{\rho^2 d\rho}{\sqrt{(\rho^2+z^2)^5}}\right], \quad (17)$$

где q_r — давление на ее внутреннем радиусе *r*; *R* — внешний радиус треугольной кольцевой нагрузки.

Оба интеграла в квадратных скобках являются известными [37], их сумма дает несложное выражение:

$$\sigma_{zt}(R,r,z) = \frac{q_r z}{R-r}\left(\frac{Rz^2+r^3}{\sqrt{(z^2+r^2)^3}}-\frac{R}{\sqrt{z^2+R^2}}\right) =$$
$$=\alpha_t(R,r,z)q_r, \quad (18)$$

где α_t — коэффициент рассеивания напряжений по центральной вертикали под треугольной кольцевой нагрузкой q_r радиусами $R = a_1 = k_1 d$ и $r = d/2$.

При $r = 0$ выражение (18) сводится к выражению для вертикальных напряжений под конической нагрузкой, выведенному ранее в работе [38].

Из геометрических соотношений, в частности равенства объемов треугольной кольцевой нагрузки q_r и равномерной призматической q_1, получим $q_r = 2q_1$. Исходя из $R = a_1 = k_1 d$ (5) и $r = d/2$, а также выражений (7) и (9), запишем аналитическую рабочую формулу для определения напряжений под пятой сваи с учетом треугольной кольцевой пригрузки:

$$\sigma_{zq} = \sigma_{zb} + \sigma_{z1} = q_b\left(1 - \frac{z^3}{\sqrt{\left(z^2 + d^2/4\right)^3}}\right) + \\ + \frac{2q_1 z}{k_1 - 1/2}\left(\frac{k_1 z^2 + d^2/8}{\sqrt{\left(z^2 + d^2/4\right)^3}} - \frac{k_1}{\sqrt{z^2 + k_1^2 d^2}}\right), \quad (19)$$

где q_r — интенсивность треугольной кольцевой нагрузки (пригрузки вокруг пяты сваи) на ее внутреннем радиусе $r = d/2$, т.е. у грани пяты сваи; q_1 — среднее давление в зоне кольцевой пригрузки.

По полученным по выражению (19) напряжениям σ_{zq} расчет осадки s_b проводится в соответствии со схемой (рис. 4) интегрированием по формуле [33, 39]:

$$s_b = \int_{H_c}^{0} \beta(z)\frac{\sigma_{zq}}{E(z)}dz, \quad (20)$$

где β — коэффициент влияния бокового обжатия грунта, определяемый согласно исследованиям [33, 39] для круглых фундаментов по зависимости:

$$\beta = 1 - 2\nu\xi_c\alpha^2, \quad (21)$$

где ξ_c — коэффициент бокового давления при компрессии, связанный в теории упругости с коэффициентом Пуассона u формулой $\xi_c = \nu/(1 - \nu)$ и определяемый обычно в геотехнической практике по приведенной выше эмпирической зависимости Яки ($\xi_c = 1 - \sin\varphi$); α — подсчитанный по формуле (14) коэффициент рассеивания напряжений.

Зависимость (21) учитывает стесняющую боковые деформации грунта шероховатость (сцепление с основанием) подошвы фундамента (пяты сваи), а также влияние вертикальной кольцевой пригрузки q_1 по ее контуру. При $\alpha = 1$ (по подошве пяты) боковые деформации минимальны, напряжения близки к одометрическим и $\beta = 1 - 2\nu\xi_c$. С отдалением от пяты сваи дополнительные (от внешней нагрузки) боковые напряжения уменьшаются и на бесконечности стремятся к нулю, что соответствует одноосному сжатию и $\beta = 1$.

Подобным образом с помощью коэффициента рассеивания напряжений a [39] разработан учет стесняющего влияния сцепления на контакте расположенных в пределах H_c разнородных слоев грунта, в том числе сцепления у H_c с несжимаемой подстилающей толщей. Однако с учетом методики СП 22 выбора величины H_c при обычных диаметре d (до 2–3 м) пяты сваи и заглублении ($l/d > 5$) в пределах H_c, как правило, располагается сравнительно однородный грунт и учет слоистости с модификацией зависимости (210) неактуален.

В публикациях [33, 39] приведены методики применения в (3c) величины модуля деформаций грунта $E(z)$ с учетом соотношения между величиной действующего напряжения σ_{zq} и давления природного уплотнения σ_p, определяемого согласно СП 22 параметрами типа коэффициентов предуплотнения OCR или POP [22]. Указано [33, 40], что получаемые обычно по данным изысканий графики линейного изменения σ_p с глубиной более адекватно описываются более общей зависимостью:

$$\sigma_p = (\sigma_{zg} + dp_q)\, R_{oc}, \quad (22)$$

где dp_q и R_{oc} — давление и коэффициент переуплотнения, характеризующие два физических механизма формирования σ_p: механическое переуплотнение, обусловленное предшествующими нагружениями (dp_q) и физико-химическим (тиксотропным) упрочнением (R_{oc}). Преимущество зависимости (22) над внедренным[3] в геотехническую практику раздельным применением OCR или POP демонстрируют обобщенные экспериментальные материалы [41], свидетельствующие о постоянстве величин параметров dp_q и R_{oc} по глубине литологически однородных слоев грунта.

При наличии надежных данных по графикам давления природного уплотнения $\sigma_p(z)$ значения $E(z)$ для расчетов по (3b) определяются по выражению:

$$E(z) = \sigma_{zq}/[(\sigma_{zq} - \sigma_p)/E_o + (\sigma_p - \sigma_{zg})/E_e]. \quad (23)$$

В нормативном (СП 22) методе приближенно принимается одномерная компрессия с $\beta = 0{,}8$ ($\nu \approx 0{,}25$), $\sigma_p = \sigma_{zg}$ и интегрирование выполняется послойным суммированием. Так как для свайных фундаментов $\sigma_{zg} << \sigma_{zg}$ расчетная зависимость СП 22 для осадки приближенно сводится к простейшему виду, использующемуся согласно СНиП II-Б.5:

$$s_b \approx 0{,}8\sum_{i=1}^{n}\frac{\sigma_{zq,i}h_i}{E_i}. \quad (24)$$

В формулах (9), (12), (20), (24) разницей между максимальной осадкой под центром круговой нагрузки и жестким штампом пренебрегается в запас надежности расчета проектной осадки. Влияние жесткости пяты можно надежным и рациональным образом учесть, используя сопоставление упругих решений для равномерной гибкой нагрузки [35] и шероховатого жесткого штампа [42]. Этим способом получим:

$$s_b = \frac{\pi(1-2\nu)}{4\log(3-4\nu)(1-\nu)}s_{b0} = k_b s_{b0}. \quad (25)$$

Раскрывая для $\nu = 0{,}5$ неопределенность в выражении (25) по правилу Лопиталя, получим, что

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

в диапазоне ν = 0 – 0,5 величина k_b = 0,71 – 0,79 и составляет 0,76 при среднем значении ν = 0,25.

3. Сопоставление результатов расчетов разными методами

Результаты расчетов, представленные в 1.2, аналитическими способами сопоставлялись с результатами расчетов численным методом, отвечающим нормативной концепции СП 22 и СП 24, в частности, расчета свайной ячейки по упругопластической модели Кулона – Мора программы Плаксис[3] с расчетной областью с $r_x = 10L$ и $H = 6L$ (см. рис. 1), разбитой на мелкие (very fine) 15-узловые конечные элементы в примыкающей к свае зоне радиусом L на глубину $L/2$ ниже пяты сваи. Обозначим такой расчет как МС Plaxis*.

Для общей сопоставимости результатов численного расчета МС Plaxis*, аналитического решения (1) и способов, разработанных с использованием подхода [24, 27] с суммированием составляющих суммарной осадки, все рассматриваемые результаты расчетов осадки одиночной сваи сведем к единой форме (1) безразмерного коэффициента осадки $I_{sd} = (s_b + s_c)G_1 d/P$.

При определении I_{sd} способом [24] компоненты общей осадки сваи s_c и s_b рассчитывались соответственно по формулам (5) и (6). В решении [27] s_c определяется также по выражению (5), а при расчете s_b по выражению (9). В разработанном в настоящей работе усовершенствовании метода [27] s_c и s_b рассчитываются соответственно по формулам (11) и (20) с применением (19) и (21). В методе СНиП II-Б.5 $s_c = 0$ и $s = s_b$ рассчитаны по формуле (24) от нагрузки на сваю P, равномерно распределенной по площади условного фундамента радиусом r_{quf}.

Сопоставление всех представленных способов определения осадки одиночной сваи возможно и целесообразно выполнить при типовых геотехнических условиях фундирования сваями, для которых известны характерные величины $k_P = P_b/P$, а также параметры жесткости грунта $g_{12} = G_1/G_2 = E_1/E_2$. Характерные величины этих параметров объективно оценим по нормативным таблицам СП 24 и СП 22.

В примере 1 рассмотрим применение вытеснительных (п. 6.4а СП 24) ж/б свай диаметром d = 325 мм, длиной L = 7–12 м, выполненных в условных двухслойных основаниях из нелессовой глины мягкопластичной (коэффициент консистенции I_L = 0,75, пористости e = 0,95, удельный вес γ = 17 кПа/м, степень влажности S_r = 0,85 по табл. А.2 СП 22, модуль общей деформации E = 8 МПа, угол внутреннего трения φ = 10°, удельное сцепление c = 33 кПа) толщиной L, подстилаемой четвертичным песком средней крупности и плотности (e = 0,63, γ = 17,5 кПа/м, по табл. А.1 СП 22 E = 40 МПа, φ = 35°, c = 1,2 кПа). По табл. 7.2 и табл. 7.3 СП 24 имеем R = 3,7–4,2 МПа и рост f от 4 до 9,2 кПа в интервале глубин 1–12 м. По правилам СП 24 примем рабочую нагрузку на сваю $P = (P_{bu} + P_{1u})/1{,}4$. Из сопоставления прочностных показателей контактного трения на поверхности сваи f с прочностными показателями окружающего сваю грунта в контактных интерфейсах при расчете МС Plaxis* примем Rinter = 0,2.

Рассматривая основной случай работы сваи, когда предельное боковое трение $P_{1u} = \pi d \int_0^L f dz$ реализуется при так называемой сдвиговой осадке, составляющей порядка 1–2 см [27, 43], заведомо меньшей по величине, чем проектная осадка сваи, примем $P_1 = P_{1u}$ и $P_b = P - P_1$.

По табл. А.3 и А.1 СП 22 E_1 = 8 МПа и E_2 = 40 МПа. Пренебрегая армированием и длительными процессами согласно табл. 6.11 СП 63[6] для тяжелого бетона класса В25 естественного твердения, примем E_p = 24 000 МПа. С учетом данных величин P и P_b расчетная глубина сжимаемой толщи под пятой сваи $z_c = L + 1{,}09 – 1{,}25$ м.

Данные сопоставления рис. 4 демонстрируют, что при характерном для применения свай двухслойном основании с более жестким подстилающим слоем особенно сильные отличия по I_{sd} наблюдаются между описывающим упругое взаимодействие решением (1) и приближенным способом *quf* (условного фундамента радиусом r_{quf} СНиП II-Б.5) с одной стороны (группа 1), и, с другой стороны, учитывающих ограниченное развитие упругопластических деформаций способами (группа 2), применяющими формулы (6), (9) и (20) или расчет МС Plaxis*. Занижение осадки свай в первой группе можно объяснить выравнивающим распределением нагрузки на большую площадь упругого основания. Отличия результатов во второй группе обусловлены методикой учета деформаций от передаваемых сваей на грунт нагрузок. При характерном для применения свай двухслойном основании с более жестким подстилающим слоем, в частности, при низких величинах g_{12} отличия между способами (6), (20) и МС Plaxis* оказываются незначительными. По сравнению с ними способ (9) несколько завышает осадки сваи, особенно для длинных свай. Сравнивая (6) и (9), можно заключить, что завышение осадки способом (6) за счет неограниченной сжимаемой толщи (упругое полупространство) компенсируется отбрасыванием части нагрузки, предаваемой на грунтовый массив боковой поверхностью сваи. В формуле упругого полупространства (9) учтена полная нагрузка и компенсации завышения сжимаемой толщи отсутствуют.

В примере 2 рассмотрены буронабивные (по п. 6.5а СП 24) ж/б сваи диаметром d = 600 мм, длиной L = 5–20 м, E_p = 24 000 МПа, выполненные в однородном основании из суглинка тугопластичного (I_L = 0,6, e = 0,65, γ = 20 кПа/м, по табл. А.2 СП 22 E = 17 МПа, φ = 24°, c = 31 кПа). По табл. 7.8 и табл. 7.3 СП 24 имеем R = 0,35–1,05 МПа и рост f от 8

[6] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01–2003. М. : Стандартинформ, 2020. 137 с.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

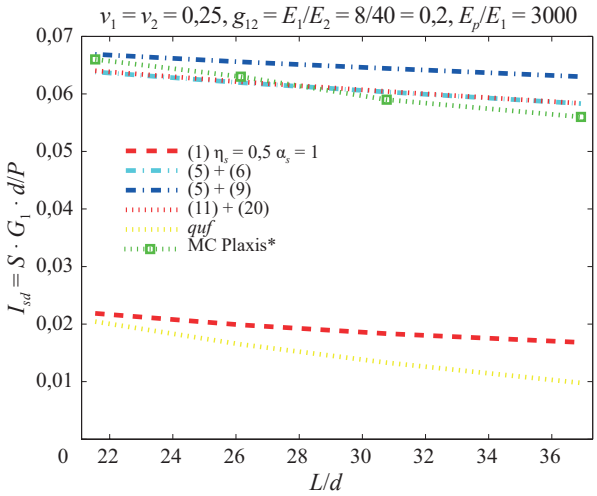


Рис. 4. Сопоставление результатов расчетов коэффициента осадки сваи в характерном двухслойном основании по решениям (1) [1], MC Plaxis*[3], (5) + (6) [25], (5) + (9) [27], СНиП II-Б.5 (*quf*) и предлагаемым способом (11) + (20)

Fig. 4. Comparison of the results of calculations of the pile settlement coefficient in a typical two-layer foundation according to solutions (1) [1], MC Plaxis*[3], (5) + (6) [25], (5) + (9) [27], SNiP II-B.5 (*quf*) and the proposed method (11) + (20)

до 20 кПа в интервале глубин 1–20 м. Из сопоставления прочностных показателей контактного трения на поверхности сваи f с прочностными показателями окружающего сваю грунта в контактных интерфейсах MC Plaxis* примем Rinter = 0,15. Аналогично примеру 1 примем $P = (P_{bu} + P_{1u})/1{,}4$, $P_1 = P_{1u}$ и $P_b = P - P_{1u}$. Расчетная глубина сжимаемой толщи под пятой сваи z_c для этих нагрузок составила $L + 2{,}5d$.

Данные сопоставлений (рис. 5) показывают, что при характерном для применения висячих свай оснований с однородной жесткостью наблюдается характер расхождений между указанными выше двумя группами, аналогичен примеру 1 (см. рис. 4), а во второй группе расхождение результатов возрастает. В частности, при приближении $g_{12} = 1$ у способа (6) осадки значительно ниже, чем у (9), (20) и MC Plaxis*. Способ (9) так же, как в примере, прогнозирует наибольшие осадки сваи, особенно для длинных свай.

В целом сопоставление рис. 4 и 5 показывает, что расчетные осадки по обоснованному в настоящей работе решению (11) + (20) наиболее близки к осадкам по численному расчету MC Plaxis*[3], значительно превышают полученные способами [1] и СНиП II-Б.5, несколько больше, чем у способа [24] для висячих свай, и во всех случаях меньше, чем по способу [27]. Завышение расчетных осадок в способе [27] можно объяснить применением упругой зависимости (9), которая предполагает бесконечность сжимаемой толщи (упругое полупространство).

Таким образом, сопоставление рис. 4 и 5 показывает, что расчет осадки по оптимизирующему методу [27] решению (11) + (20) является достаточно надежным и рациональным. Также данные этих сопоставлений и, в частности, результаты расчетов численным методом по отвечающим нормативной концепции СП 24 и СП 22 упругопластической модели Кулона – Мора программы Плаксис (MC Plaxis*)[3] показали, что нормативная СП 24 методика назначения расчетной нагрузки на сваи обеспечивает значительный запас надежности, минимизирует развитие упругопластических деформаций грунта под пятой сваи.

Сущностный анализ показывает, что отличия между решением (1) [1] и способами (5) + (6) [24], (5) + (9) [27] и (11) + (20) обуславливаются разницей в описании работы грунта под пятой сваи. Если в первом случае описывается начальное (касательное) линейное сопротивление упругого грунта, то во втором посредством учета $k_P = P_{bu}/P_u (P_b = k_P P)$ предполагается среднее (секущее), фактически упругопластическое, сопротивление грунта под пятой сваи в диапазоне допускаемой на нее расчетной нагрузки.

Целесообразность применения того или иного подхода зависит от практической задачи. Если она ограничивается проверкой расчетной осадки одиночной сваи, т.е. величину следует определять предложенным способом (11) + (20). Если задача ставится об определении проектной осадки и расчете конструкций свайных фундаментов методом нелинейных

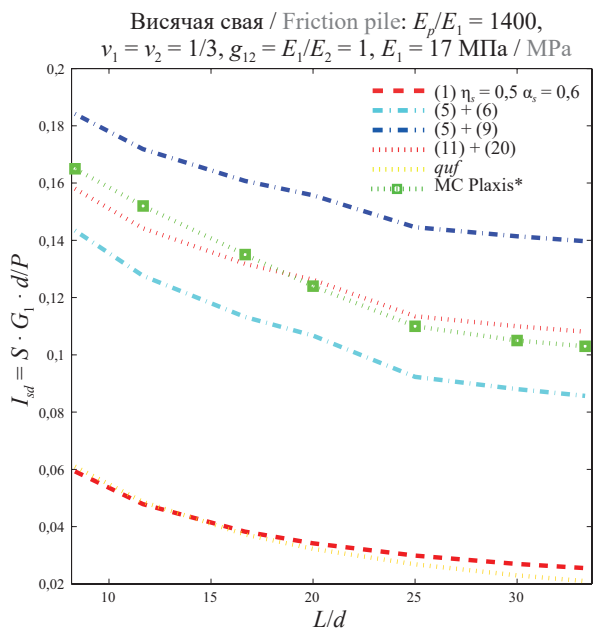


Рис. 5. Сопоставление результатов расчетов коэффициента осадки типичной висячей сваи в характерном однородном основании по решениям (1) [1], MC Plaxis*[3], (5) + (6) [24], (5) + (9) [27], СНиП II-Б.5 (*quf*) и предлагаемым способом (11) + (20)

Fig. 5. Comparison of the results of calculations of the settlement coefficient of a typical friction pile in a characteristic homogeneous foundation according to solutions (1) [1], MC Plaxis*[3], (5) + (6) [24], (5) + (9) [27], SNiP II-B.5 (*quf*) and the proposed method (11) + (20)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

контактных элементов [2, 44–46], то для оценки их начальной жесткости наиболее удобно решение (1), а для учета дальнейшей трансформации жесткости стоит использовать решение (11) + (20).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Практическая значимость

При проектировании свайных фундаментов необходимо определить допускаемую нагрузку на сваю и ее осадку при этой нагрузке, вызывающую на практике допускаемые рамки упругопластического состояния вмещающего сваю грунтового массива. Геометрические размеры сваи (диаметр, длина), механические свойства окружающих и подстилающих грунтов оказывают значительное влияние на осадку сваи и должны учитываться адекватной методикой расчета.

Отмечено, что разработанное посредством аппроксимации упругого решения для сваи в упругом полупространстве решение (1) следует применять для оценки начального линейного сопротивления сваи.

Полученные результаты позволяют рекомендовать для определения проектной осадки расчет по разработанной методике суммированием составляющих осадки (11) и (20). Эта методика посредством применения рациональных схем и модели работы грунта обеспечивает адекватный учет распределения расчетной нагрузки на сваю между ее боковой поверхностью и пятой, соответствующего ему упругопластического состояния вмещающего сваю грунтового массива.

Разработанное линеаризующее решение (11) + (20) целесообразнее использовать для проектной оценки осадки сваи s_P от допускаемой на нее рабочей нагрузки P и определения среднего коэффициента жесткости сваи K_P. При наличии существенного группового эффекта расчет осадки свайного фундамента ведется по схеме эквивалентной одиночной сваи [7]. Этот способ, в отличие от условного фундамента СП 24, позволяет выполнить учет жесткости ствола эквивалентной сваи и обоснованный выбор размеров и величин внутренней и периметральной нагрузки на подстилающую сваи толщу. Полученные коэффициенты жесткости свай или свайного фундамента в целом могут использоваться для расчета его конструкции методом, указанным в труде [44].

Совместное использование решений (1) и (11) + (20) дает возможность определить параметры нелинейных контактных моделей [2, 45, 46], описывающих трансформацию начального линейного сопротивления грунта, к расчетному упругопластическому состоянию вмещающего сваи грунтового массива. Адекватное определение этих параметров дает возможность выполнить по этим практичным моделям надежные и рациональные расчеты конструкций свайных фундаментов, в том числе пространственных, и при неоднородном по глубине и плану грунтовом основании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Упрощенные решения для расчета осадки одиночных свай востребованы строительной практикой, повышение точности и общности таких решений обеспечивает определение адекватных параметров контактных моделей для разработки надежных и рациональных конструкций свайных фундаментов.

Разработанные посредством аппроксимации упругого решения для сваи в упругом полупространстве решения, в частности зависимости (1), целесообразно использовать для оценки начального линейного сопротивления сваи.

Для задачи определения осадки сваи с учетом практической упругопластической работы грунта в диапазоне допускаемой на сваю расчетной нагрузки разработаны актуальные уточнения метода [24] формулами (10) и (9), а метода [27] формулами (11) и (12).

Разработанное линеаризующее решение (11) + (20) целесообразно использовать для проектной оценки осадки сваи s_P от допускаемой на нее рабочей нагрузки P и определения среднего коэффициента жесткости сваи K_P. При наличии существенного группового эффекта расчет осадки свайного фундамента ведется по схеме эквивалентной одиночной сваи [7]. Этот способ, в отличие от условного фундамента СП 24, позволяет выполнить учет жесткости ствола эквивалентной сваи и обоснованный выбор размеров и величин внутренней и периметральной нагрузки на подстилающую сваи толщу. Полученные коэффициенты жесткости свай или свайного фундамента в целом могут применяться для расчета его конструкции данным методом [44].

Совместное использование решений (1) и (11) + (20) дает возможность определить параметры нелинейных контактных моделей [2, 45, 46], описывающих трансформацию начального линейного сопротивления грунта, к фактическому упругопластическому сопротивлению вмещающего сваи грунтового массива.

Достоинством разработанного решения (11) + (20) являются учет, обоснованные экспериментальные данные и хорошо зарекомендовавшие себя в геотехнической практике способы, концентрации напряжений и деформаций в примыкающих к месту передачи нагрузки областях грунта. Поскольку деформации вокруг сваи преимущественно имеют сдвиговой характер, следующей планируемой авторами работой является исследование вопроса использования в расчетах установленной по данным прямых испытаний грунта на сдвиг величины его модуля сдвига. Это особенно актуально из-за упругопластических эффектов неопределенным образом, изменяющих упругое соотношение $G = E/2/(1 + \nu)$ между модулями сдвига и Юнга (сжатия) грунта. В свою очередь, концентрация деформаций в при-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

мыкающей к пяте сваи зоне ограниченной толщины требует исследовать влияние этого фактора на адекватность использования формулы Буссинеска – Шлейхера [9, 28] для определения модуля сжатия грунта по данным штамповых испытаний ГОСТ 20276.1[7].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Алексеев А.Г., Безволев С.Г.* Актуализация линейной телескопической модели осадки сваи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 718–733. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.718-733. EDN WIOGQO.

2. *Федоровский В.Г., Левачев С.Н., Курилло С.В., Колесников Ю.М.* Сваи в гидротехническом строительстве : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2003. 240 с. EDN QNKHAN.

3. *Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С.* Прогноз осадок свайных фундаментов. М. : Стройиздат, 1994. 384 с.

4. *Poulos H.G., Davis E.H.* Pile Foundation Analysis and Design. Sydney : Rainhom Bridge Book Co., 1980. 398 p.

5. *Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K.* Piling Engineering. 3rd ed. Boca Raton, FL : CRC Press Taylor & Francis Group, 2020. 406 p.

6. *Randolph M.F., Wroth C.P.* Analysis of deformation of vertically loaded piles // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1978. Vol. 104. Issue 12. Pp. 1465–1488. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000729

7. *Randolph M.F.* Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts // Proceeding of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). 1994. Vol. 5. Pp. 61–82.

8. *Mylonakis G., Gazetas G.* Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil // Geotechnique. 1998. Vol. 48. Issue 1. Pp. 55–72. DOI: 10.1680/geot.1998.48.1.55

9. *Schleicher F.* Zur Theorie des Baugrundes // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1925. Bd. 5. S. 199; Bauingenieur. 1926. Bd. 7. Heft 48. S. 931–935. Heft 49. S. 949–952.

10. *Giroud J.P.* Tables pour le calcul des fondations. T.1. Tassement. Paris : Dunod, 1972. 383 p.

11. *Тер-Мартиросян З.Г., Тер-Мартиросян А.З., Ермошина Л.Ю.* Осадка и длительная несущая способность сваи // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 18–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23. EDN HEIXNL.

12. *Безволев С.Г.* Аналитическое решение для расчета дополнительных осадок свайных полей // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 4 (243). С. 58–65. EDN PCOHRJ.

13. *Федоровский В.Г., Безволев С.Г.* Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 3. С. 11–15. EDN KSYPMF.

14. *Безволев С.Г.* Общая методика расчета напряженно-деформированного состояния массива грунта с упрочняющими или ослабляющими элементами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2008. № 3. С. 2–8. EDN SKFDDP.

15. *Боков И.А., Федоровский В.Г.* Об учете неоднородности грунта по глубине в расчетах осадки свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 4. С. 2–6. EDN QIVGYU.

16. *Banerjee P.K., Davies T.G.* The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils // Geotechnique. 1978. Vol. 28. Issue 3. Pp. 309–326. DOI: 10.1680/geot.1978.28.3.309

17. *Butterfield R., Banerjee P.K.* The elastic analysis of compressible piles and pile groups // Geotechnique. 1971. Vol. 21. Issue 1. Pp. 43–60. DOI: 10.1680/geot.1971.21.1.43

18. *Слепак М.Э.* Осадки и НДС пластично-мерзлого грунта в основании центрально-нагруженной сваи // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. 1982. С. 154–158.

19. *Rajapakse R.K.N.D.* Response of an axially loaded elastic pile in a Gibson soil // Geotechnique. 1990. Vol. 40. Issue 2. Pp. 237–249. DOI: 10.1680/geot.1990.40.2.237

20. *Lee C.Y., Small J.C.* Finite-Layer Analysis of Axially Loaded Piles // Journal of Geotechnical Engineering. 1991. Vol. 117. Issue 11. Pp. 1706–1722. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1991)117:11(1706)

21. *Готман Н.З.* Определение сопротивления сдвигу грунта по боковой поверхности забивных свай в численных расчетах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 6. С. 8–13. EDN YWZHML.

22. *Шарафутдинов Р.Ф., Разводовский Д.Е., Закатов Д.С.* Инженерный метод прогноза осадки одиночных свай с учетом упругопластического поведения грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 3. С. 7–15. EDN OFOAVE.

23. *Голубков В.Н.* Вопросы исследования свайных фундаментов и проектирования по деформациям : автореф. дис. … д-ра техн. наук. М., 1969. 35 с.

24. *Tomlinson M., Woodward J.* Pile Design and Construction Practice. 6-th edition. London : CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. DOI: 10.1201/b17526

[7] ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. М. : Стандартинформ, 2020. 14 с.

25. *Poulos H.G.* Tall Building Foundation Design. London : CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. DOI: 10.1201/9781315156071

26. *Барвашов В.А.*, *Экимян Н.Б., Аршба Э.Т.* Методы оценки несущей способности свай при действии вертикальной нагрузки. М. : ВНИИИС, 1986. 69 с.

27. *Готман А.Л., Гавриков М.Д.* Расчет длинномерных буронабивных свай на вертикальную нагрузку // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 4. С. 2–8. EDN MSBJDN.

28. *Boussinesq J.* Applications des Potentiels a l'Etitude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. Paris : Gauthier-Villiars, Imprimeur-Libraire, 1885.

29. *Силин К.С., Глотов Н.М., Завриев К.С., Луга А.А*. Свайные фундаменты. М. : Транспорт, 1975. 432 с.

30. *Geddes J.D.* Boussinesq-Based Approximations to the Vertical Stresses Caused by Pile-Type Subsurface Loadings // Geotechnique. 1969. Vol. 19. Issue 4. Pp. 509–514. DOI: 10.1680/geot.1969.19.4.509

31. *Geddes J.D.* Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading // Geotechnique. 1966. Vol. 16. Issue 3. Pp. 231–255. DOI: 10.1680/geot.1966.16.3.231

32. *Mindlin R.D.* Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid // Physics. 1936. Vol. 7. Issue 5. Pp. 195–202. DOI: 10.1063/1.1745385

33. *Федоровский В.Г., Безволев С.Г.* Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2000. № 4. С. 10–18. EDN WESCFN.

34. *Ефремов М.Г., Коновалов П.А., Михеев В.В.* К вопросу о распределении послойных деформаций грунта в сжимаемой толще глинистых и песчаных оснований (по материалам полевых испытаний) // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1963. № 6. С. 5–7. EDN XYWMZF.

35. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов. Т. 1: Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. Л. ; М. : Госстройиздат, 1959. 357 с.

36. *Nishida Y.* Vertical stress and vertical deformation of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite // Proceedings of the 1st International Society for Rock Mechanics Congress. 1966. Vol. 2. Pp. 493–498.

37. *Смолянский М.Л.* Таблицы неопределенных интегралов. М. : Физматгиз, 1963. 112 с.

38. *Harr M.E., Lovell C.W.* Vertical stresses under certain axisymmetrical loading // Highway Research Record. 1963. Vol. 39. Pp. 68–81.

39. *Безволев С.Г.* Методика учета деформируемости неоднородного упругопластического основания при расчете фундаментных плит // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 8–14. EDN VZFWXG.

40. *Федоровский В.Г., Безволев С.Г.*, *Дунаева О.М.* Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом основании // Нелинейная механика грунтов : тр. IV Рос. конф. СПб., 1993. С. 81–86.

41. *Ladd C.C., Germaine J.T., Lancellotta R., Jamiolkowski M.B.* New developments in Field and Laboratory Testing of Soils // 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1985. Vol. 1. Pp. 57–154.

42. *Моссаковский В.И.* Основная смешанная задача теории упругости для полупространства с круговой линией раздела граничных условий // Прикладная математика и механика. 1954. Т. 18. № 2. С. 187–196.

43. *Савинов А.В.* Применение свай, погружаемых вдавливанием, при реконструкции исторической застройки городов : автореф. дис. … д-ра техн. наук. Волгоград, 2008. 34 с.

44. *Клепиков С.Н.* Расчет конструкций на упругом основании. Киев : Будівельник, 1967. 184 с.

45. *Клепиков С.Н.* Расчет сооружений на деформируемом основании. Киев : НИИ Строительных конструкций, 1996. 203 с.

46. *Безволев С.Г.* Проблемы проектирования и расчета фундаментов при применении больших групп свай и других вертикальных элементов преобразования грунтового массива // Геотехника. 2011. № 3. С. 30–67. EDN OWGMPZ.

Поступила в редакцию 30 июня 2025 г.
Принята в доработанном виде 22 октября 2025 г.
Одобрена для публикации 22 октября 2025 г.

Об авторах: **Андрей Григорьевич Алексеев** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заместитель генерального директора по научной работе; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 59; SPIN-код: 9753-4640, РИНЦ ID: 873091, Researcher ID: AAB-8070-2020, ORCID: 0000-0001-6020-0328; adr-alekseev@ya.ru;

Степан Георгиевич Безволев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Научно-исследовательского центра «Строительство»**

(НИИОСП НИЦ «Строительство»); 109428, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 59; РИНЦ ID: 271303, Scopus: 6602971111; compgeo@ya.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alekseev A.G., Bezvolev S.G. Updating the linear telescopic pile settlement model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):718-733. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.718-733. EDN WIOGQO.(rus.).

2. Fedorovsky V.G., Levachev S.N., Kurillo S.V., Kolesnikov Yu.M. *Piles in hydraulic engineering: tutorial*. Moscow, ASV Publishing House, 2003; 240. EDN QNKHAN. (rus.).

3. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. *Forecast of settlement of pile foundations*. Moscow, Stroyizdat, 1994; 384. (rus.).

4. Poulos H.G., Davis E.H. *Pile Foundation Analysis and Design*. Sydney, Rainhom Bridge Book Co., 1980; 398.

5. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. *Piling Engineering. 3rd ed*. Boca Raton, FL, CRC Press Taylor & Francis Group, 2020; 406.

6. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1978; 104(12):1465-1488. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000729

7. Randolph M.F. Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. *Proceeding of the* 13*th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE).* 1994; 5:61-82.

8. Mylonakis G., Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. *Geotechnique*. 1998; 48(1):55-72. DOI: 10.1680/geot.1998.48.1.55

9. Schleicher F. Zur Theorie des Baugrundes. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1925. Bd. 5. S. 199; Bauingenieur. 1926. Bd. 7. Heft 48. S. 931-935. Heft 49. S. 949-952.

10. Giroud J.P. *Tables pour le calcul des fondations. T.1. Tassement*. Paris, Dunod, 1972; 383.

11. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Yu. Settlement and long-term bearing capacity of the pile. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 9:18-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23. EDN HEIXNL.(rus.)

12. Bezvolev S.G. Analytical solution for calculating additional settlements of pile fields. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2012; 4(243):58-65. EDN PCOHRJ. (rus.).

13. Fedorovsky V.G., Bezvolev S.G. Method of calculation of pile fields and other vertical reinforced soil masses. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1994; 3:11-15. EDN KSYPMF. (rus.).

14. Bezvolev S.G. General procedure for analysis of the stress-strain state of a soil mass with strengthening or weakening elements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2008; 3:2-8. EDN SKFDDP. (rus.).

15. Bokov I.A., Fedorovskii V.G. Taking into account the soil depth inhomogeneity in calculation of the piles settlement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 4:2-6. EDN QIVGYU. (rus.).

16. Banerjee P.K., Davies T.G. The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils. *Geotechnique*. 1978; 28(3):309-326. DOI: 10.1680/geot.1978.28.3.309

17. Butterfield R., Banerjee P.K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique*. 1971; 21(1):43-60. DOI: 10.1680/geot.1971.21.1.43

18. Slepak M.E. Rainfall and the VAT of plastic and frozen soil in the basis of the central loaded pile. *Soil rheology and engineering permafrost science*. 1982; 154-158. (rus.).

19. Rajapakse R.K.N.D. Response of an axially loaded elastic pile in a Gibson soil. *Geotechnique*. 1990; 40(2):237-249. DOI: 10.1680/geot.1990.40.2.237

20. Lee C.Y., Small J.C. Finite-Layer Analysis of Axially Loaded Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1991; 117(11):1706-1722. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1991)117:11(1706)

21. Gotman N.Z. Determination of the shear strength of soil along the lateral surface of driven piles in numerical investigations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 6:8-13. EDN YWZHML. (rus.).

22. Sharafutdinov R.F., Razvodovskii D.E., Zakatov D.S. Single bored pile settlement prediction taking into account the elastic-plastic behavior of the soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 3:7-15. EDN OFOAVE. (rus.).

23. Golubkov V.N. *Issues of studying pile foundations and designing based on deformations : abstract of dissertation of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1969; 35. (rus.).

24. Tomlinson M., Woodward J. *Pile Design and Construction Practice. 6-th edition*. London, CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. DOI: 10.1201/b17526

25. Poulos H.G. *Tall Building Foundation Design*. London, CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. DOI: 10.1201/9781315156071

26. Barvashov V.A., Ekimyan N.B., Arshba E.T. *Methods for assessing the bearing capacity of piles under vertical load*. Moscow, VNIIIS, 1986; 69. (rus.).

27. Gotman A.L., Gavrikov M.D. Calculation of long bored piles for vertical loading. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 4:2-8. EDN MSBJDN. (rus.).

28. Boussinesq J. *Applications des Potentiels a l'Etitude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques.* Paris, Gauthier-Villiars, Imprimeur-Libraire, 1885.

29. Silin K.S., Glotov N.M., Zavriev K.S., Luga A.A. *Pile foundations*. Moscow, Transport, 1975; 432. (rus.).

30. Geddes J.D. Boussinesq-Based Approximations to the Vertical Stresses Caused by Pile-Type Subsurface Loadings. *Geotechnique*. 1969; 19(4):509-514. DOI: 10.1680/geot.1969.19.4.509

31. Geddes J.D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading. *Geotechnique*. 1966; 16(3):231-255. DOI: 10.1680/geot.1966.16.3.231

32. Mindlin R.D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid. *Physics*. 1936; 7(5):195-202. DOI: 10.1063/1.1745385

33. Fedorovskii V.G., Bezvolev S.G. Prediction of shallow-foundation settlements and selection of bed models for slab analysis. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2000; 4:10-18. EDN WESCFN. (rus.).

34. Efremov M.G., Konovalov P.A., Mikheev V.V. On the distribution of layer-by-layer soil deformations in the compressible thickness of clay and sandy foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1963; 6:5-7. EDN XYWMZF. (rus.).

35. Florin V.A. *Fundamentals of Soil Mechanics. Vol. 1: General dependencies and stress state of foundations of structures*. Leningrad; Moscow, Gosstroyizdat, 1959; 357. (rus.).

36. Nishida Y. Vertical stress and vertical deformation of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite. *Proceedings of the 1st International Society for Rock Mechanics Congress.* 1966; 2:493-498

37. Smolyanskiy M.L. *Tables of indefinite integrals*. Moscow, Fizmatgiz, 1963; 112. (rus.).

38. Harr M.E., Lovell C.W. Vertical stresses under certain axisymmetrical loading. *Highway Research Record*. 1963; 39:68-81.

39. Bezvolev S.G. Method of accounting for the deformability of an inhomogeneous elastoplastic bed in analyzing foundation slabs. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2002; 5:8-14. EDN VZFWXG. (rus.).

40. Fedorovskiy V.G., Bezvolev S.G., Dunayeva O.M. Methodology for calculating foundation slabs on a nonlinearly deformable base. *Nonlinear soil mechanics : proc. 4th Russian Conf.* St. Petersburg, 1993; 81-86. (rus.).

41. Ladd C.C., Germaine J.T., Lancellotta R., Jamiolkowski M.B. New developments in Field and Laboratory Testing of Soils. *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1985; 1:57-154.

42. Mossakovsky V.I. The main mixed problem of elasticity theory for a half-space with a circular line of separation of boundary conditions. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1954; 18(2):187-196. (rus.).

43. Savinov A.V. *Application of piles driven by pressing in the reconstruction of historical urban development : abstract of dis. ... Doctor of Technical Sciences.* Volgograd, 2008; 34. (rus.).

44. Klepikov S.N. *Calculation of structures on an elastic foundation*. Kyiv, Budivelnik, 1967; 184. (rus.).

45. Klepikov S.N. *Calculation of structures on a deformable foundation*. Kyiv, Research Institute of Building Structures, 1996; 203. (rus.).

46. Bezvolev S.G. Problems of designing and computing foundations when large groups of piles and other vertical elements of a ground massif transformation are used. *Geotechnics*. 2011; 3:30-67. EDN OWGMPZ. (rus.).

Received June 30, 2025.
Adopted in revised form on October 22, 2025.
Approved for publication on October 22, 2025.

Bionotes: **Andrej G. Alekseev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Deputy Director General for Scientific Work; **Research Center "Construction"**; 59 Ryazansky prospect, Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 9753-4640, ID RSCI: 873091, Researcher ID: AAB-8070-2020, ORCID: 0000-0001-6020-0328; adr-alekseev@ya.ru;

Stepan G. Bezvolev — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher; **Research, Research, Design, Survey, and Engineering Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevnov of the Research Center "Construction"**; 59 Ryazansky prospect, Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 271303, Scopus: 6602971111; compgeo@ya.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 69:331.36.502
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717

Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях

Валерий Николаевич Азаров[1], Олег Васильевич Бурлаченко[1], Елена Владимировна Сысоева[2], Александр Олегович Бурлаченко[1]

[1] Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия;
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного подхода к управлению безопасностью труда и экологической безопасностью на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) строительных объектов в условиях плотной городской застройки. Цель работы — разработка математической модели для выбора эффективных организационно-технологических решений, интегрирующей технико-экономические, экологические и социальные параметры.
Материалы и методы. В основе исследования лежит усовершенствованная математическая модель, базирующаяся на комплексном критерии, который включает приведенные затраты, вероятность наступления событий ЖЦ и количественную оценку техногенного воздействия. Модель дополнена коэффициентами, учитывающими уровень автоматизации γ, пространственные ограничения ψ и адаптивность к изменяющимся условиям θ. Для валидации модели применялся мониторинг качества воздуха с использованием IoT-датчиков на строительных площадках в г. Волгограде, данные интегрировались в BIM-платформу.
Результаты. Разработанная модель позволяет количественно оценить эффективность решений через минимизацию комплексного критерия K_{ij}. Апробация на объектах (земляные и штукатурные работы) показала, что внедрение мер пылеподавления (туманообразование, вытяжные установки) снижает значение критерия в 1,40–2,48 раза. Расхождение прогнозных и фактических данных мониторинга не превысило 15 %, что подтверждает адекватность модели.
Выводы. Предложенная модель является эффективным инструментом для адаптивного управления строительными проектами. Она обеспечивает комплексный учет рисков, динамическое обновление данных на основе BIM и IoT и адаптацию к условиям плотной городской застройки. Результаты исследования рекомендуются к применению для повышения экологической безопасности и безопасности труда на протяжении всего ЖЦ объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологическая безопасность, управление безопасностью труда, модель выбора эффективных решений, жизненный цикл, пылевое загрязнение, IoT-датчики, количественная оценка техногенного воздействия

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс), научный проект «Теоретические основы выбора эффективных решений, направленных на повышение рациональности использования и экологической безопасности городских территорий» (соглашение № 25-29-20187).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Сысоева Е.В., Бурлаченко А.О.* Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1707–1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717

Автор, ответственный за переписку: Олег Васильевич Бурлаченко, oburlachenko@yandex.ru.

A model for selecting effective solutions to enhance occupational safety and environmental safety of construction in urban areas

Valerij N. Azarov[1], Oleg V. Burlachenko[1], Elena V. Sy'soeva[2], Alexander O. Burlachenko[1]

[1] Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;
[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is driven by the need for an integrated approach to managing occupational safety and environmental safety at all stages of the life cycle of construction projects in dense urban environments. The aim

© В.Н. Азаров, О.В. Бурлаченко, Е.В. Сысоева, А.О. Бурлаченко, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

of the work is to develop a mathematical model for selecting effective organizational and technological solutions that integrates technical, economic, environmental, and social parameters.
Materials and methods. The research is based on an improved mathematical model founded on a comprehensive criterion that includes reduced costs, the probability of life cycle events occurring, and a quantitative assessment of technogenic impact. The model is enhanced with coefficients accounting for the level of automation γ, spatial constraints ψ, and adaptability to changing conditions θ. For model validation, air quality monitoring was performed using IoT sensors on construction sites in Volgograd; the data was integrated into a BIM platform.
Results. The developed model allows for a quantitative assessment of the effectiveness of solutions through the minimization of the comprehensive criterion K_{ij}. Testing on specific operations (earthworks and plastering) showed that the implementation of dust suppression measures (fogging systems, exhaust units) reduces the criterion value by a factor of 1.40–2.48. The discrepancy between forecasted and actual monitoring data did not exceed 15 %, confirming the model's adequacy.
Conclusions. The proposed model is an effective tool for the adaptive management of construction projects. It ensures comprehensive risk accounting, dynamic data updates based on BIM and IoT, and adaptation to dense urban conditions. The study's results are recommended for application to enhance environmental safety and occupational safety throughout a facility's entire life cycle.

KEYWORDS: decision-making model, life cycle, dust pollution, IoT sensors

Acknowledgments. This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation for "Conducting Fundamental Scientific Research and Exploratory Scientific Research by Small Individual Research Groups" (regional competition), under the research project "Theoretical Foundations for Selecting Effective Solutions Aimed at Improving the Rational Use and Environmental Safety of Urban Areas" (agreement No. 25-29-20187).

FOR CITATION: Azarov V.N., Burlachenko O.V., Sy'soeva E.V., Burlachenko A.O. A model for selecting effective solutions to enhance occupational safety and environmental safety of construction in urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1707-1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717 (rus.).

Corresponding author: Oleg V. Burlachenko, oburlachenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В строительной сфере качество управленческой деятельности является сложной задачей, поскольку процесс управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов недвижимости представляет собой многозвенную, продолжающуюся многие годы цепь не всегда последовательных событий (этапов ЖЦ), предполагающих необходимость сложных стохастических подходов к созданию методологии управления. В этой связи важен правильный выбор критериев оптимизации, варьируя которые можно вырабатывать наиболее эффективное управленческое решение, учитывающее, помимо технико-экономических, и экологические аспекты.

На текущий момент в строительстве все еще широко применяется метод вариантного проектирования. Данный подход включает рассмотрение нескольких альтернативных вариантов и выбор оптимального на основе заранее определенных критериев. Однако существенным недостатком такого метода служит неучет динамических факторов, изменяющихся в ходе эксплуатации системы. В частности, вариантное проектирование не всегда позволяет учитывать:

- адаптивность системы к изменяющимся условиям окружающей среды;
- степень автоматизации процессов мониторинга и контроля загрязнений;
- пространственные ограничения, влияющие на размещение сенсоров и оборудования.

Помимо того, применяемые долгое время методики принятия решений при выборе технических, технологических, конструктивных вариантов развития строительного проекта дают возможность осуществлять выбор только для одного этапа ЖЦ объекта строительства, как правило, этапа реализации проекта, т.е. строительства. При этом оставляется без внимания, какую эффективность будет демонстрировать принятое решение на всем ЖЦ. Современные требования к качеству строительной продукции могут быть удовлетворены только при реализации системного подхода к инвестиционно-строительному процессу как к управлению ЖЦ объектов строительства на всем его протяжении.

Современные строительные процессы в условиях плотной городской застройки сопровождаются значительными техногенными нагрузками на окружающую среду и требуют повышенного внимания к обеспечению безопасности труда. Для оценки эффективности организационно-технологических решений разработана математическая модель, учитывающая вероятность техногенных рисков и динамику их изменения на основе данных, поступающих из BIM-систем и IoT-устройств.

Разработка модели выбора эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при строительном производстве и экологической безопасности городских территорий, обусловлена необходимостью комплексного подхода к анализу условий труда и экологической ситуации в строительной отрасли. В отличие от существующих методов, модель выбора эффективных решений должна учитывать не только экономические, но и экологические и социальные параметры, интегрируя их в единый критерий оценки.

В качестве примеров различного подхода к принятию управленческих решений можно отметить результаты исследований, изложенные в публикациях отечественных и зарубежных ученых. Так, работы [1–3] развивают известный алгоритм выбора решений на основе сравнительной оценки технико-экономических показателей на этапе строительства объекта.

Авторы трудов [4–9] разработали методики, базирующиеся на применении концепции технологий информационного моделирования в строительстве и позволяющие учитывать в оценке критериев безопасности труда и экологической безопасности рассматриваемые варианты производства строительных процессов.

Публикации [10–14] сфокусированы на изучении влияния различных факторов на интенсивность пылевого загрязнения окружающей среды непосредственно при строительстве зданий и сооружений, транспортировке строительных грузов. При этом большое внимание уделяется анализу негативного влияния частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ выделяемой мелкодисперсной пыли на здоровье человека. Помимо антропогенных рассматриваются и природные факторы в качестве источников пылевого загрязнения.

Краткий анализ приведенных исследований свидетельствует о том, что предлагаемые методики дают возможность осуществлять выбор того или иного управленческого решения для конкретных видов технологических строительных процессов, не позволяя реализовывать системный подход к выбору эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при строительном производстве и экологической безопасности городских территорий на протяжении всего ЖЦ объектов строительства.

В работах [15–17] развита модель, позволяющая осуществлять выбор наиболее эффективных решений не только при производстве строительных работ на этапе реализации инвестиционно-строительного проекта (ИСП), но реализовать системный подход к управлению ЖЦ строительного объекта. Предложенный авторами данных исследований подход интегрируется с технологиями информационного моделирования в строительстве (ТИМ), позволяя, с одной стороны, уже на ранних этапах ЖЦ принимать эффективные решения с учетом технических, технологических, экономических и экологических факторов. С другой стороны, модель дает возможность вырабатывать наиболее эффективные управляющие воздействия на управляемые системы в зависимости от фактических значений возмущающих воздействий и дестабилизирующих факторов на протяжении ЖЦ.

В основе современных методологий управления сложными техническими системами, к которым относятся и городские территории, лежит кибернетический аппарат, предложенный Н. Винером еще в 1948 г. [18]. Данный аппарат универсален, что позволяет применять его для анализа управленческой деятельности в разных предметных областях для принятия управленческих решений. Однако эта универсальность в то же время ставит перед исследователями очень сложные задачи. Применение кибернетического аппарата может вызывать значительные трудности при изучении комплексных технических и особенно социальных систем, требующих учета множества факторов и нелинейных взаимодействий. Кибернетический подход фокусируется на изучении обратной связи, черных ящиков и производных концептов, таких как управление и коммуникация. Он рассматривает системы абстрактно, вне зависимости от их материальной природы.

Таким образом, для расшифровки «черного ящика», являющегося ядром кибернетического алгоритма, необходимо структурно представить его в виде сложнейшей иерархической системы. Этот аппарат позволит принимать эффективные решения при возможности описания всех взаимосвязей между всеми элементами системы на каждом ее уровне, начиная с самых простых. Следовательно, для реализации управленческой функции необходимо разработать математические модели с корректно определенными критериями оптимальности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье авторы развивают модель, описанную в работах [15–17].

Модель дает возможность выбирать наиболее эффективное решение по управлению ЖЦ объектов строительства. За основу методики выбора принят комплексный критерий, включающий технико-экономическую эффективность рассматриваемых решений, их экологическую безопасность с точки зрения воздействия на окружающую среду и здоровье работников и жителей рассматриваемой городской территории, а также вероятность наступления того или иного события (этапа) ЖЦ:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^{m} \frac{C_{\text{пр.уд.}ijk} \cdot \lambda_{ijk}}{P_{ijk}}, \quad (1)$$

где K_{ij} — комплексный критерий, оценивающий эффективность j-го значения параметров i-го технологического решения; m — количество этапов ЖЦ (событий); k — номер этапа ЖЦ объекта строительства (события), возникающего с определяемой в соответствии с методикой [19] вероятностью; $C_{\text{пр.уд.}ijk}$, P_{ijk} — приведенные удельные затраты, необходимые для исполнения i-го технологического решения; λ_{ijk} — количественный критерий техногенного воздействия на окружающую среду и человека на всех этапах ЖЦ при исполнении принятого i-го решения.

Эта модель, по сравнению с существующими моделями оценки эффективности строительных решений, обладает рядом преимуществ:

1. Комплексный учет рисков — в отличие от традиционных методов, включающих только экономические и экологические параметры, модель интегрирует технологические и организационные характеристики, влияющие на безопасность труда.

2. Использование BIM и IoT — модель позволяет динамически обновлять параметры оцен-

ки на основе данных с датчиков, что обеспечивает адаптивное управление строительными процессами. При исследовании применяли методику мониторинга качества воздуха на основе интернета вещей на строительных площадках, предложенную в работе [20].

3. Пространственная адаптация — учитываются особенности плотной городской застройки, что особенно важно для мегаполисов с высоким уровнем техногенного загрязнения.

4. Гибкость в условиях неопределенности — возможность корректировать оценку при изменении внешних условий (например, при ухудшении качества воздуха или необходимости использования новых технологий переработки отходов).

Данная модель позволяет повысить точность выбора оптимального решения, однако она не учитывает ряд важных факторов, таких как уровень автоматизации, пространственные ограничения и адаптивность системы.

Для дальнейшего совершенствования оценки эффективности организационно-технологических решений разработана математическая модель, учитывающая вероятность техногенных рисков и динамику их изменения на основе сведений, поступающих из BIM-систем и IoT-устройств. Вводимые в модель факторы учитываются введением в нее коэффициентов автоматизации, пространственных ограничений и адаптивности к условиям эксплуатации. Разработка этой модели обусловлена необходимостью комплексного подхода к анализу условий труда и экологической ситуации в строительной отрасли.

Введение дополнительных факторов позволило более точно моделировать реальные условия эксплуатации системы и повысить ее эффективность на всем ЖЦ. В процессе исследования проводилось тестирование модели и ее сравнительная оценка с предыдущими вариантами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы выбора эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при производстве строительных процессов и экологической безопасности городских территорий, предлагается следующий комплексный критерий:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^{m} \frac{C_{\text{пр.уд.}ijk} \cdot \lambda_{ijk} \cdot \psi_{ijk}}{P_{ijk} \cdot \theta_{ijk} \cdot \gamma_{ijk}}, \qquad (2)$$

где ψ_{ijk} — коэффициент, отражающий влияние пространственных ограничений на безопасность труда (например, работа в условиях плотной застройки, ограниченной видимости, повышенного риска аварийных ситуаций); θ_{ijk} — коэффициент адаптивности технологического решения к изменяющимся условиям окружающей среды (чем выше значение, тем гибче решение к изменению погодных условий, загрязнению воздуха, нагрузке на инфраструктуру и др.); γ_{ijk} — коэффициент, учитывающий степень автоматизации процессов и уровень цифрового мониторинга через BIM и IoT (более высокие значения соответствуют лучшей управляемости процесса и сниженным рискам).

При этом целевой функцией выбора эффективных решений в соответствии с моделью (2) является минимизация значений K_{ij}, т.е. из всех рассматриваемых вариантов решений выбирается то, для которого значение комплексного критерия минимально ($K_{ij} \rightarrow \min$).

Важный момент применения разработанной модели — корректное установление численных значений введенных в нее факторов.

Стесненность городских условий производства работ ψ_{ijk} на этапах изысканий, строительства, реконструкции, капитального ремонта, расширения, технического перевооружения учитывали в соответствии с методикой, определяемой приказом Минстроя РФ от 04.08.2020 № 421/пр.

Далее приведены некоторые значения коэффициента пространственных ограничений в зависимости от конкретных условий производства работ (таблица).

Для установления критерия γ_{ijk} (индекс информатизации) в данной работе применяли следующую методику. Первоначально определяли коэффициент автоматизации технологических процессов в строительстве k_a как отношение времени, затрачиваемого на автоматизированные операции t_a, к общему времени выполнения процесса $t_н$. С этой целью проводили следующие операции:

1. Проводили хронометраж всех операций технологического процесса с определением его общей продолжительности.

2. Замеряли время, затрачиваемое на автоматизированные операции.

3. Определяли соотношение численных результатов замеров, выполненных по п. 2 к замерам по п. 1.

Очевидно, что при выполнении условия $k_a \rightarrow 1$ технологический процесс является автоматическим; при $k_a \leq 0{,}5$ процесс мало автоматизирован.

Далее рассчитывали коэффициент $k_ц$, учитывающий уровень цифрового мониторинга при реализации рассматриваемого ИСП. Данный показатель служит одним из весовых коэффициентов, используемых для расчета итоговой оценки по каждому направлению методики оценки эффективности цифровизации строительной отрасли. Он позволяет оценить степень применения ТИМ в объектах капитального строительства, которые интегрированы в информационную систему управления проектами государственного заказчика в сфере строительства (ИСУП).

Коэффициент цифрового мониторинга в строительстве определяется как отношение объема данных, собранных и обработанных с использова-

Значения коэффициента пространственных ограничений

Values of the spatial constraint coefficient

Условия производства работ Working conditions	Значение ψ_{ijk} Value ψ_{ijk}
Производство работ осуществляется на территории действующего предприятия с наличием в зоне производства работ одного или нескольких из перечисленных ниже факторов: • разветвленной сети транспортных и инженерных коммуникаций; • стесненных условий для складирования материалов; • действующего технологического оборудования; • движения технологического транспорта The work is carried out on the territory of an existing enterprise, where one or more of the following factors are present in the work area: • an extensive network of transport and engineering communications; • limited space for storing materials; • existing technological equipment; • the movement of technological transport	1,15
Производство работ осуществляется в стесненных условиях населенных пунктов Work is carried out in the cramped conditions of populated areas	1,15
Производство работ по возведению конструктивных элементов встраиваемых помещений внутри строящегося объекта капитального строительства (при возведенных несущих конструктивных элементах), что в соответствии с требованиями технической безопасности приводит к ограничению действий рабочих по производству работ Work on the construction of structural elements of built-in rooms inside the under-construction capital construction facility (with the constructed load-bearing structural elements), which, in accordance with the requirements of technical safety, leads to the restriction of the actions of workers on the production of work	1,20
Производство работ осуществляется в помещениях и иных ограниченных пространствах высотой до 1,8 м Work is carried out in rooms and other confined spaces up to 1.8 m high	1,35

нием цифровых технологий, к общему количеству собранных сведений. Он может принимать значения от 0 до 1, где 0 означает отсутствие использования цифровых технологий, 1 — полное использование цифровых технологий для мониторинга строительства. Численные значения коэффициента определяли в соответствии с «Методикой расчета показателей оценки эффективности формирования цифровой вертикали строительной отрасли субъектами Российской Федерации».

Следует учесть, что коэффициент цифрового мониторинга в строительстве является не только характеристикой уровня цифровизации ИСП, но и субъекта РФ в целом.

На завершающем этапе рассчитывали индекс информатизации как произведение коэффициента автоматизации технологических процессов и коэффициента цифрового мониторинга в строительстве:

$$\gamma_{ijk} = k_a \cdot k_{\text{ц}}. \quad (3)$$

Введение в модель коэффициента адаптивности технологического решения к изменяющимся условиям окружающей среды θ_{ijk} обусловлено принятыми в Российской Федерации нормативными документами согласно приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 15.10.2021 № 754/пр «Об утверждении плана адаптации к изменениям климата в сферах строительства, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения Российской Федерации».

Коэффициент адаптивности технологического решения в строительстве к изменяющимся условиям окружающей среды отражает способность строительного процесса приспосабливаться к этим изменениям. Он включает оценку гибкости, устойчивости и адаптивности технологий и методов строительства к внешним воздействиям и изменениям в окружающей среде. Для определения численных значений коэффициента использовали данные и значения, изложенные в СП 131.13330.2020: СНиП 23-01–99* «Строительная климатология», а также адаптировали методику, предложенную в труде [21], к условиям ЖЦ исследуемых объектов строительства.

При этом применяли следующий алгоритм: проводили анализ факторов природно-климатических воздействий, возникающих на протяжении ЖЦ объекта строительства. Далее выявляли факторы, вызывающие риски ухудшения параметров ЖЦ (увеличение сроков строительства, снижение долговечности и т.д.), выполняли классификацию факторов. Затем анализировали технико-технологические решения, применяемые строительными организациями, характеризующие уровень готовности организации превентивно применять управляющие воздействия на объект управления с целью сниже-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

ния негативного влияния природно-климатических явлений как дестабилизирующих факторов.

Численные значения коэффициента адаптивности технологического решения определяли как функцию нескольких факторов:

$$\theta_{ijk} = (T, W, R, S), \quad (4)$$

где T — температурный фактор (учитывает влияние температурных колебаний на строительство, рассчитывается на основе климатологических данных согласно СП 131.13330.2020: СНиП 23-01–99* «Строительная климатология»); W — влажностный фактор (отражает влияние осадков и влажности на строительные процессы); R — устойчивость технологии к внешним нагрузкам (ветровые нагрузки с учетом средних и максимальных скоростей ветра, а также на их направлении согласно СП 131.13330.2020: «СНиП 23-01–99* «Строительная климатология»); S — фактор, учитывающий наличие в рассматриваемых сравниваемых управляющих решениях технологий, позволяющих снизить негативное влияние природно-климатических воздействий. Значения этого коэффициента определяются эффективностью применяемых решений.

На основании полученных результатов коэффициенту адаптивности технологического решения в строительстве к изменяющимся условиям окружающей среды присваивали численные значения. Значения $\theta_{ijk} \to 1$ соответствуют высокому уровню способности решений по управлению ЖЦ приспосабливаться к различным климатическим и экологическим факторам, таким как ветер, землетрясения, ураганы и другие экстремальные нагрузки.

Следует отметить, что коэффициент адаптивности не может принимать нулевое значение, так как нормативной документацией строительства устанавливаются поправочные коэффициенты, учитывающие факторы природно-климатических воздействий на объект управления (например, увеличение норм времени в зимний период, коэффициенты неравномерности поставок и потребления материально-технических ресурсов, учет динамических и сейсмонагрузок и т.д.).

Для определения коэффициентов λ_1, λ_2, …, λ_n, выражающих количественную оценку интенсивности техногенного воздействия на человека и окружающую среду в процессе ЖЦ при реализации рассматриваемого управляющего решения, была применена следующая методика. В качестве показателя загрязненности и воздействия на здоровье людей в данной работе исследовалась мелкодисперсная пыль.

Пыль в воздухе состоит из частиц разных размеров, и их воздействие на здоровье человека и окружающую среду зависит от размера. Для точной оценки техногенного воздействия предлагается использовать дифференциальное распределение пыли по размерам частиц, выраженное через функцию плотности распределения $D'(\delta)$, где δ — размер частиц. Средневзвешенная концентрация пыли определяется как $C = \int_{\delta min}^{\delta max} D'(\delta) C(\delta) d\delta$, где $C(\delta)$ — концентрация частиц размера δ, а интегрирование проводится по диапазону 0,5–10 мкм, соответствующему наиболее опасным фракциям (PM_{10}) [22].

Для учета техногенного воздействия пыли в воздухе коэффициент λ_{ijk} определяли через дифференциальное распределение частиц по размерам:

$$\lambda_{ijk} = \lambda_0 \cdot \left(1 + \chi \int_{0,5}^{10} D'(\delta) C(\delta) d\delta\right), \quad (5)$$

где базовое значение λ_0 соответствует минимальному воздействию, а χ регулирует чувствительность к концентрации пыли, определяемую на основе нормативов или эмпирических данных; $D'(\delta)$ — функция плотности распределения пыли; $C(\delta)$ — концентрация частиц размера δ, а интегрирование проводится в диапазоне 0,5–10 мкм (PM_{10}).

В модели K_{ij} коэффициент λ_{ijk} корректирует затраты $C_{\text{пр.уд.}ijk}$ с учетом техногенного воздействия пыли, усиливая влияние концентрации вредных веществ на итоговую оценку эффективности.

Диапазон 0,5–10 мкм выбран, так как он охватывает частицы PM_{10}, которые способны проникать в дыхательные пути и оказывать значительное воздействие на здоровье человека, согласно стандартам ВОЗ и национальным нормативам (например, ГОСТ Р 54578–2011).

Для валидации разработанной модели (2) и оценки ее применимости к реальным условиям плотной городской застройки выполнены натурные измерения параметров пылевого загрязнения (PM_{10} и $PM_{2,5}$) на двух типовых объектах г. Волгограда в 2024–2025 гг. Представлены результаты замеров при проведении земляных и отделочных работ.

При производстве земляных работ рассматривалась подготовка котлована под многофункциональный комплекс в Центральном районе (площадь 0,8 га, грунт — лёссовидные суглинки, характерные для региона).

Для исследования пылеобразования при производстве отделочных работ были выбраны штукатурные работы в ЖК «Фаренгейт», расположенном на границе Центрального и Ворошиловского районов г. Волгограда на этапе внутренней отделки.

Мониторинг осуществляли с использованием IoT-датчиков качества воздуха (тип: SDS011, точность ±10 %), интегрированных в локальную BIM-платформу объекта для пространственной привязки данных и расчета интегральных показателей в реальном времени [20]. Информация собиралась с дискретностью 5 мин в течение характерных технологических операций (выемка/погрузка грунта, замес сухой смеси, затирка поверхностей).

Ниже приведена методика валидации разработанной модели выбора эффективных решений.

1. Расчет коэффициента техногенного воздействия (λ_{ijk}) для Волгограда, отражающего пылевое

воздействие (5). Экспериментальные данные позволили определить функцию плотности распределения пыли $D'(\delta)$ и концентрации $C'(\delta)$ для рассматриваемых строительных процессов.

Для земляных работ $D'(\delta)$ показала бимодальное распределение с пиками в диапазонах 2,5–4 мкм (35 %) и 8–10 мкм (45 %). Средневзвешенная концентрация C в рабочей зоне составила 1480 мкг/м^3 (PM_{10}), 520 мкг/м^3 ($PM_{2,5}$). Приняли $\lambda_0 = 1$ (базовое воздействие), $\chi = 0{,}002$ (согласно ГОСТ Р 54578–2011 и данным [11]). В результате расчета получено значение $\lambda_{ijk} = 3{,}96$.

Для штукатурных работ $D'(\delta)$ — выраженный пик в диапазоне 0,5–2,5 мкм (75 % частиц $PM_{2,5}$); средневзвешенная концентрация C в рабочей зоне 880 мкг/м^3 (PM_{10}), 650 мкг/м^3 ($PM_{2,5}$). При этом подстановка значений измерений в расчетную модель позволяет получить следующий результат: $\lambda_{ijk} = 2{,}76$.

2. Корректировка коэффициентов модели на основе локальных условий.

Коэффициент пространственных ограничений ψ_{ijk} определяли согласно таблице.

Индекс информатизации γ_{ijk} для земляных работ при невысоком уровне автоматизации $k_a \approx 0{,}3$ (управление техникой оператором). Коэффициент цифрового мониторинга $k_ц$ при использовании 5 IoT-датчиков принимали равным 0,6. Соответственно, $\psi_{ijk} = 0{,}18$.

Для штукатурных работ уровень автоматизации более низок в связи с высокой долей ручных работ $k_a \approx 0{,}05$. Мониторинг включал 2 датчика на этаж $k_ц \approx 0{,}4$. Таким образом, $\psi_{ijk} = 0{,}02$.

При определении коэффициента адаптивности θ_{ijk} при земляных работах учитывались сезонные факторы Волгограда (жаркое лето, ветры). Применяли периодическое орошение (адаптивность средняя). На основе выражения (4) и данных СП 131.13330.2020 $\theta_{ijk} = 0{,}65$.

При производстве штукатурных работ внутри здания защита от внешней среды на высоком уровне. Но при естественной вентиляции (адаптивность к внутренней запыленности низкая) $\theta_{ijk} = 0{,}45$.

3. Применение комплексной модели (2) для определения эффективности технологий пылеподавления. За базовый сценарий принималось производство работ без дополнительных мер пылеподавления на этапе строительства. Приведенные удельные затраты принимали в соответствии со сметной документацией объектов (усреднено). В результате расчетов получены следующие значения K_{ij}: 46 810 для земляных работ и 312 800 для штукатурных.

При производстве земляных работ с применением системы туманообразования значения C сократились до 550 мкг/м^3 (PM_{10}), что позволило снизить λ_{ijk} до 2,1. Кроме того, незначительно увеличилось значение χ_{ijk} до 0,2 вследствие дополнительного применения датчика влажности. Значение θ_{ijk} возросло до 0,80 (лучшая адаптивность к пыли). В результате подстановки полученных значений в выражение (2) $K_{ijk} = 18\,867$, что в 2,48 раза ниже, чем для базового сценария.

Для штукатурных работ, проводимых с применением локальных вытяжных установок с HEPA-фильтром (применяли фильтровентиляционную установку ФВУ-1РК), зафиксировали снижение C до 220 мкг/м^3 (PM_{10}). При этом $\lambda_{ijk} = 1{,}44$. Значение χ_{ijk} возросло до 0,1 (автоматизация включения вытяжки), а θ_{ijk} — до 0,7. После подстановки всех значений в выражение (2) получили $K_{ij} = 22\,719$. Таким образом, эффективность принятого решения с учетом критерия экологической безопасности возросла в 1,4 раза.

4. Валидацию модели на примере г. Волгограда выполнили по следующим критериям:

• точность прогноза — сравнение расчетных концентраций пыли с данными IoT-мониторинга показало расхождение менее чем на 15 % для земляных и 12 % для штукатурных работ после калибровки χ. Основной вклад в погрешность вносит изменчивость ветровой нагрузки (R в θ_{ijk}), характерная для Волгограда;

• чувствительность модели. Наибольшее влияние на K_{ij} в условиях Волгограда оказывают: λ_{ijk} (уменьшение на 40 % снижает K_{ij} на 35 %), χ_{ijk} (повышение уровня мониторинга/автоматизации на 0,1 дает снижение K_{ij} на 8–12 %), ψ_{ijk} (значения 1,15–1,20 существенно увеличивают итоговый критерий, подчеркивая важность выбора технологий для плотной застройки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная в результате проведенных исследований модель обладает следующими преимуществами по сравнению с существующими:

1. Комплексный учет рисков — в отличие от традиционных методов, включающих только экономические и экологические параметры, модель интегрирует технологические и организационные характеристики, влияющие на рациональность использования и экологическую безопасность городских территорий.

2. Использование BIM и IoT — модель позволяет динамически обновлять параметры оценки на основе данных с датчиков, что обеспечивает адаптивное управление ЖЦ объекта строительства.

3. Пространственная адаптация — учитываются особенности плотной городской застройки, что особенно важно для мегаполисов с высоким уровнем техногенного загрязнения.

4. Гибкость в условиях неопределенности — коэффициенты ψ_{ijk} и θ_{ijk} дают возможность корректировать оценку при изменении внешних условий (например, при ухудшении качества воздуха или необходимости использования новых технологий переработки отходов).

5. Экспериментальная апробация на объектах г. Волгограда (земляные и штукатурные работы) по-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

казала, что модель адекватно прогнозирует пылевое воздействие λ_{ijk} с погрешностью менее 15 %, а внедрение мер пылеподавления снижает комплексный критерий K_{ij} в 1,4–2,48 раза.

Сравнение расчетных значений с данными BIM-моделирования и IoT-мониторинга подтверждает высокую точность модели.

Применение на строительных площадках в условиях плотной застройки, где пространственные ограничения играют ключевую роль в безопасности труда.

Соответствие существующим нормативным требованиям по охране труда и экологии, что делает модель применимой в реальных строительных проектах.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что предложенная математическая модель в рамках BIM и IoT-платформ обеспечивает комплексную оценку эффективности организационно-технологических решений, направленных на повышение безопасности труда при производстве строительных процессов на различных этапах ЖЦ объектов строительства и экологической безопасности городских территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иванов П.П., Сидоров А.Н.* Методика оценки экологических рисков при организации строительных работ // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 2. 105–112.

2. *Кабанов В.Н.* Технический критерий выбора экскаватора для разработки котлована // Инженерный вестник Дона. 2021. № 1 (73). С. 298–306. EDN NVCAUQ.

3. *Голубова О.С.* Показатели экономической эффективности строительных работ // Экономическая наука сегодня. 2018. № 8. С. 130–138. EDN GUFYPZ.

4. *Santos Júnior J.E., Galhardo C.X., Santos V.M.L.* Innovations in the Civil Construction Sector Provided by Information Technologies // Revista Gestão Inovação e Tecnologias. 2019. Vol. 9. Issue 4. DOI: 10.7198/geintec.v9i4.1382

5. *Jin R., Zhong B., Ma L., Hashemi A., Ding L.* Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle // Automation in Construction. 2019. Vol. 106. P. 102861. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861

6. *Ma W., Yin Y., Yang G., Li Q., Lu B.* Comprehensive Performance Evaluation Method of Green Materials for Coastal Buildings Based on BIM // Journal of Coastal Research. 2019. Vol. 93. Issue sp1. P. 304. DOI: 10.2112/SI93-040.1

7. *Okakpu A., Hoseini A.G., Tookey J., Haar J., Ghaffarianhoseini A.* Exploring the environmental influence on BIM adoption for refurbishment project using structural equation modelling // Architectural Engineering and Design Management. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 41–57. DOI: 10.1080/17452007.2019.1617671

8. *Shafique M., Rafiq M.* An Overview of Construction Occupational Accidents in Hong Kong: A Recent Trend and Future Perspectives // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 10. P. 2069. DOI: 10.3390/app9102069

9. *Shuang D., Heng L., Skitmore M., Qin Y.* An experimental study of intrusion behaviors on construction sites: The role of age and gender // Safety Science. 2019. Vol. 115. Pp. 425–434. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.035

10. *Филиппов А.А., Сулейманов И.Ф., Арсланов М.А.* Теоретические основы комплексного подхода к оценке экологической опасности автотранспорта на участке урбанизированной территории // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 97–103. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97. EDN YZKKWD.

11. *Калюжина Е.А., Сергина Н.М., Елфимов К.А., Стреляева А.Б.* Исследование пылевыделений в окружающую атмосферу и в атмосферу рабочей зоны при производстве ремонтно-строительных работ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 371–378. EDN CCPQTW.

12. *Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J.* Dust dispersion patterns during construction processes: A multi-process simulation study // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 8451.

13. *Глинянова И.Ю., Асанова Н.В.* Исследование количества мелкодисперсной пыли и ее химического состава в жилой зоне населенных пунктов с позиции экологической безопасности предприятий строительной индустрии // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 23 (75). С. 89–100. EDN YINDOJ.

14. *Brown J., Smith K.* Environmental Impact Assessment for Urban Construction // Journal of Sustainable Engineering. 2021. Vol. 45. Issue 6. Pp. 230–245.

15. *Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Оганесян О.В.* Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 329–335. EDN KYLMXS.

16. *Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Азарова М.Д.* Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестник МГСУ.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

2024. Т. 19. № 3. С. 456–468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468. EDN LRYYEO.

17. *Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Елфимов К.А.* Методология принятия оптимальных решений по управлению жизненным циклом объекта капитального строительства с учетом критерия пылевого загрязнения атмосферного воздуха // Экономика строительства и природопользования. 2023. № 3 (88). С. 48–54. EDN WVQQUR.

18. *Wiener N.* Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine. The MIT Press, 1948. 231 p.

19. *Азаров В.Н., Бурлаченко А.О.* Организация строительного производства с учетом экологичной безопасности принимаемых решений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 1 (41). С. 76–83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT.

20. *Zhang L., Wang Y.* Application of IoT-based Air Quality Monitoring in Construction Sites // Environmental Engineering Research. 2022. Vol. 38. Issue 3. Pp. 78–92.

21. *Акентьева Е.М., Клюева М.В.* Адаптация строительной отрасли экономики к изменению климата на основе анализа погодно-климатических рисков (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2018. № 590. С. 103–117. EDN VPJDUG.

22. *Манжилевская С.Е.* Экологические риски на строительной площадке при точечной застройке в городе // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 6. С. 35–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-35-41. EDN JPDUYP.

Поступила в редакцию 22 августа 2025 г.
Принята в доработанном виде 24 августа 2025 г.
Одобрена для публикации 15 сентября 2025 г.

Об авторах: **Валерий Николаевич Азаров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства, советник РААСН; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297, ResearcherID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Олег Васильевич Бурлаченко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, заместитель директора Института архитектуры и строительства по научной работе; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 282520, Scopus: 41761032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Институт архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Александр Олегович Бурлаченко — преподаватель кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: HHM-5981-2022, ORCID: 0000-0003-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ivanov P.P., Sidorov A.N. Methodology of environmental risk assessment in the organization of construction works. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2019; 2:105-112. (rus.).

2. Kabanov V.N. Technical criteria for choosing an excavator for pit development. *Engineering journal of Don*. 2021; 1(73):298-306. EDN NVCAUQ. (rus.).

3. Holubava V.S. Indicators of economic effectiveness construction works. *Economics of this day*. 2018; 8:130-138. EDN GUFYPZ. (rus.).

4. Santos Júnior J.E., Galhardo C.X., Santos V.M.L. Innovations in the Civil Construction Sector Provided by Information Technologies. *Revista Gestão Inovação e Tecnologias*. 2019; 9(4). DOI: 10.7198/geintec.v9i4.1382

5. Jin R., Zhong B., Ma L., Hashemi A., Ding L. Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle. *Automation in Construction*. 2019; 106:102861. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861

6. Ma W., Yin Y., Yang G., Li Q., Lu B. Comprehensive Performance Evaluation Method of Green Materi-

als for Coastal Buildings Based on BIM. *Journal of Coastal Research*. 2019; 93(sp1):304. DOI: 10.2112/SI93-040.1

7. Okakpu A., Hoseini A.G., Tookey J., Haar J., Ghaffarianhoseini A. Exploring the environmental influence on BIM adoption for refurbishment project using structural equation modelling. *Architectural Engineering and Design Management*. 2020; 16(1):41-57. DOI: 10.1080/17452007.2019.1617671

8. Shafique M., Rafiq M. An Overview of Construction Occupational Accidents in Hong Kong: A Recent Trend and Future Perspectives. *Applied Sciences*. 2019; 9(10):2069. DOI: 10.3390/app9102069

9. Shuang D., Heng L., Skitmore M., Qin Y. An experimental study of intrusion behaviors on construction sites: The role of age and gender. *Safety Science*. 2019; 115:425-434. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.035

10. Filippov A.A., Suleymanov I.F., Arslanov M.A. Theoretical foundations of an integrated approach to the assessment of the ecological hazard of vehiclein the urbanized area. *Intellect. Innovations. Investments*. 2019; 1:97-103. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97. EDN YZKKWD. (rus.).

11. Kalyuzhina E.A., Sergina N.M., Elfimov K.A., Strelyaeva A.B. Research of dust release in the surrounding atmosphere and into the atmosphere of the working area in production of repair and construction works. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2020; 4(81):371-378. EDN CCPQTW. (rus.).

12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Dust dispersion patterns during construction processes: A multi-process simulation study. *Sustainability*. 2021; 13:8451.

13. Glinyanova I.Yu., Asanova N.V. Research of the amount of fine dust and its chemical composition in the residential area of inlanded areas from the position of environmental safety of the construction industry. *Construction and Industrial Safety*. 2021; 23(75):89-100. EDN YINDOJ. (rus.).

14. Brown J., Smith K. Environmental Impact Assessment for Urban Construction. *Journal of Sustainable Engineering*. 2021; 45(6):230-245.

15. Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Oganesyan O.V. The selection of optimal technological solutions in conditions of dense urban development based on BIM-technologies. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2020; 1(78):329-335. EDN KYLMXS. (rus.).

16. Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Azarova M.D. Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):456-468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468. EDN LRYYEO. (rus.).

17. Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Elfimov K.A. Methodology for making optimal decisions on managing the life cycle of a capital construction object, taking into account the criterion of atmospheric air dust pollution. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2023; 3(88):48-54. EDN WVQQUR. (rus.).

18. Wiener N. *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press, 1948; 231.

19. Azarov V.N., Burlachenko A.O. The construction production organization taking into account the ecological safety of the decisions taken. *Biospheric Compatibility: Man, Region, Technology*. 2023; 1(41):76-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT.(rus.).

20. Zhang L., Wang Y. Application of IoT-based Air Quality Monitoring in Construction Sites. *Environmental Engineering Research*. 2022; 38(3):78-92.

21. Akentyeva E.M., Klueva M.V. Adaptation of construction sector to climate change based on the analysis of weather and climate risks (the case of Pskov, Smolensk and Bryansk regions). *Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2018; 590:103-117. EDN VPJDUG. (rus.).

22. Manzhilevskaya S.E. Environmental risks at a construction site during infill development in the city. *Ecology and Industry of Russia*. 2024; 28(6):35-41. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-35-41. EDN JPDUYP. (rus.).

Received August 22, 2025.
Adopted in revised form on August 24, 2025.
Approved for publication on September 15, 2025.

BIONOTES: **Valerij N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction, Adviser to the RAASN; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 148320, Scopus: 7004170297, ResearcherID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production Technology, Deputy Director of the Institute of Architecture and Construction for Research; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 282520, Scopus: 41761032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Elena V. Sy'soeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Alexander O. Burlachenko — lecturer at the Department of Engineering Graphics, Standardization and Metrology, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: HHM-5981-2022, ORCID: 0000-0003-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 628.316.12:628.386
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1718-1727

Перспективы модификации метода получения струвита из высококонцентрированных сточных вод

Виталий Сергеевич Липатов, Елена Сергеевна Гогина
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются исследования влияния примесей на кристаллизацию струвита при извлечении азота и фосфора из высококонцентрированных сточных вод (СВ). Показана практическая значимость учета ингибирующих и интенсифицирующих факторов для повышения выхода и чистоты продукта.
Материалы и методы. Обобщаются рецензируемые публикации 2006–2025 гг. на русском и английском языках, отобранные по поиску в крупных библиографических базах. Анализируются типы СВ и условия процесса (диапазон кислотности, соотношение магния, аммония и фосфата, применение затравок, режимы работы реакторов) и влияние неорганических и органических примесей.
Результаты. Выделяются основные ингибиторы: кальций (перевод фосфора в фосфаты кальция), железо (III) (конкурирующее осаждение железофосфатов), тяжелые металлы (дефекты решетки и замедление роста), карбонатная система и растворенный углекислый газ (снижение доступности магния и доли фосфат-ионов), а также высокомолекулярные органические вещества (комплексообразование и пассивация поверхности). В качестве интенсификаторов описываются малые дозы алюминия с коагулирующим эффектом, использование твердых частиц как затравок и оптимизация ионной силы.
Выводы. Для устойчивого образования струвита в реальных СВ необходимы предварительная подготовка (снижение кальция и железа, удаление тяжелых металлов и органических примесей) и управление пересыщением (контроль кислотности, удаление углекислого газа, введение затравок). Учет состава примесей повышает степень извлечения фосфора и аммонийного азота и улучшает качество продукта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: струвит, кристаллизация струвита, извлечение фосфора, высококонцентрированные сточные воды, ингибиторы кристаллизации, интенсификаторы кристаллизации, извлечение азота

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Липатов В.С., Гогина Е.С.* Перспективы модификации метода получения струвита из высококонцентрированных сточных вод // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1718–1727. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1718-1727

Автор, ответственный за переписку: Виталий Сергеевич Липатов, vitalylipatov@mail.ru.

Prospects for modifying the method of obtaining struvite from highly concentrated wastewater

Vitaly S. Lipatov, Elena S. Gogina
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper examines the influence of impurities on struvite crystallization during nitrogen and phosphorus extraction from highly concentrated wastewater. The practical importance of considering inhibiting and intensifying factors to increase the yield and purity of the product is shown.
Materials and methods. The reviewed publications from 2006–2025 in Russian and English, selected by searching in large bibliographic databases, are summarized. The types of wastewater and process conditions (acidity range, magnesium, ammonium, and phosphate ratio, use of seed, reactor operating modes) and the influence of inorganic and organic impurities are analyzed.
Results. The main inhibitors are: calcium (conversion of phosphorus to calcium phosphates), iron (III) (competitive precipitation of iron phosphates), heavy metals (lattice defects and growth retardation), the carbonate system and dissolved carbon dioxide (reduced magnesium availability and the proportion of phosphate ions), and high-molecular organic substances (complexation and surface passivation). Small doses of aluminum with a coagulating effect, the use of solid particles as seed and optimization of the ionic strength are described as intensifiers.
Conclusions. For sustainable struvite formation in real wastewater, pretreatment (reduction of calcium and iron, removal of heavy metals and organic impurities) and supersaturation control (acidity control, removal of carbon dioxide, and the introduction of seeding agents) are required. Considering the composition of impurities increases the degree of extraction of phosphorus and ammonium nitrogen and improves the quality of the product.

© В.С. Липатов, Е.С. Гогина, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

KEYWORDS: struvite, struvite crystallization, phosphorus recovery, highly concentrated wastewater, crystallization inhibitors, crystallization intensifiers, nitrogen recovery

FOR CITATION: Lipatov V.S., Gogina E.S. Prospects for modifying the method of obtaining struvite from highly concentrated wastewater. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1718-1727. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1718-1727 (rus.).

Corresponding author: Vitaly S. Lipatov, vitalylipatov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление соединений азота и фосфора из сточных вод (СВ) путем осаждения их в форме малорастворимой соли — струвита становится все более востребованным. Струвит — это магний аммоний фосфат гексагидрат, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$: кристаллический минерал, образующийся при взаимодействии ионов Mg^{2+}, NH_4^+ и PO_4^{3-}; он плохо растворим в воде и действует как медленно высвобождающееся минеральное удобрение. Благодаря этому процесс сочетает очистку высококонцентрированных СВ от биогенных элементов с одновременным получением ценного агрохимиката. Струвит выпадает в осадок при определенных условиях: требуется слабощелочная среда и эквимолярное содержание в СВ ионов магния, аммония и фосфата. Технология реакционной кристаллизации струвита может применяться для различных источников отходов — от сточных вод муниципальных и промышленных очистных сооружений до отходов производства животноводческих комбинатов [1]. Контролируемая кристаллизация струвита представляет собой сложный процесс, ход и результаты которого зависят не только от основных реагентов (Mg^{2+}, NH_4^+, PO_4^{3-}), pH и других параметров, но и от присутствия посторонних примесей в исходной среде. В реальных высококонцентрированных СВ обычно присутствует множество растворенных веществ, способных вступать в побочные химические реакции. В частности, вместе со струвитом могут сосаждаться труднорастворимые соли, гидроксиды металлов и другие побочные фазы, если в растворе присутствуют примеси соответствующих ионов. Наличие таких вторичных компонентов способно существенно повлиять на кинетику и степень образования струвита, а также на свойства получаемого осадка. Тем не менее имеющиеся технологические схемы кристаллизации струвита зачастую не учитывают эти влияния, что может приводить к неполной очистке или ухудшению качества осадка, например снижению доли струвита в твердом продукте, образованию мелких или дефектных кристаллов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тематика статьи выбрана исходя из практической задачи: в реальных высококонцентрированных СВ примеси заметно меняют ход кристаллизации струвита, что влияет на степень извлечения фосфора и аммонийного азота и на качество твердого продукта; поэтому обобщение данных о таких влияниях необходимо для выбора технологических решений. Для обзора отбирались рецензируемые публикации 2006–2025 гг. из крупных библиографических баз (Scopus, Web of Science, eLibrary). Поисковые запросы состояли из сочетания слов «струвит/кристаллизация струвита», «ингибиторы», «интенсификаторы», «высококонцентрированные сточные воды», а также названия типовых матриц стоков (возвратные потоки осадка, фильтрат полигонов, животноводческие стоки). Включались оригинальные экспериментальные работы с воспроизводимой методикой и доступными параметрами процесса; исключались источники без экспериментальной части и вторичные пересказы. Из каждой работы извлекались сопоставимые показатели: pH, соотношение Mg:N:P, режим реактора и перемешивания, применение затравки, концентрации кальция, железа, тяжелых металлов и органических веществ, сведения о карбонатной системе, продолжительность процесса и характеристики полученной твердой фазы. Данные нормировались по единицам измерения и сводились в таблицы по принципу «тип сточных вод, фактор влияния, интервал концентраций, наблюдаемый эффект, источник». Для противоречивых результатов отмечались различия методик (в том числе контроль pH и удаление CO_2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вещества, интенсифицирующие образование струвита

Некоторые примеси в СВ способны положительно влиять на процесс кристаллизации струвита, выступая своеобразными катализаторами или центрами кристаллообразования. К числу таких веществ относятся многозарядные катионы, которые могут выполнять роль коагулянтов или центров кристаллизации. Наличие ионов Al^{3+} в малых концентрациях не способствует образованию собственных фосфатных фаз, а приводит к совместному осаждению со струвитом. В работе H. Saidou и соавт., 2015, в ходе экспериментов было показано, что присутствие Al^{3+} не изменяет кристаллическую фазу осадка — он по-прежнему состоит из струвита, однако это приводит к укрупнению агрегатов кристаллов [2]. Алюминий гидролизуется с образованием положительно заряженных гидроксокомплексов, что способствует коагуляции частиц струвита в более крупные агломераты. В результате повышаются фильтрационные и отделительные свойства образующегося осадка. Кроме того, присутствие Al^{3+}

может увеличивать степень извлечения фосфатов. Установлено, что увеличение концентрации Al^{3+} с 0 до 6 мг/л приводит к росту удаления фосфора из раствора с ≈32 до ≈67 % [2]. Интенсификация осаждения объясняется снижением коллоидной стабильности системы вследствие коагулирующего действия алюминия, благодаря чему большая часть фосфата переходит в твердый осадок струвита. Катионы Fe^{3+} в небольших дозах оказывают аналогичное коагулирующее воздействие, однако для железа характерно и конкурирующее образование собственных фосфатов.

Интенсификатором кристаллизации струвита могут выступать микрочастицы твердых примесей, которые выступают в качестве центров кристаллизации (затравок). В реальных СВ такими центрами могут быть взвешенные частицы как органической, так и неорганической природы, а в современных условиях — микропластики. Недавнее исследование (J. Yan и соавт., 2022) показало, что присутствие в растворе микропластиковых частиц (например, дисперсных частиц полиэтилентерефталата (ПЭТ)) заметно ускоряет инициацию и рост струвитных кристаллов [3]. Микропластик адсорбирует на своей поверхности ионы или микроосадки, становясь зародышем для струвитных кристаллов.

В лабораторных экспериментах зарегистрировано сокращение индукционного периода и повышение скорости кристаллизации струвита в ~1,4 раза при добавлении ~30 мг/л микропластика (нанесенного на частицы оксида цинка для лучшей адсорбции) по сравнению с чистым раствором. При этом образующиеся кристаллы струвита имели более четкую, хорошо выраженную форму. Таким образом, присутствие твердых дисперсных примесей может служить фактором, интенсифицирующим процесс образования струвита, особенно в реакторах с движущимся слоем, где посторонние частицы могут выполнять роль постоянной затравки кристаллизации.

Применение биоугля в качестве затравки формирует гетерогенные центры кристаллизации, сокращает индукционный период и ускоряет рост кристаллов струвита; пористая поверхность дополнительно сорбирует растворенную органику и частично снижает химическое потребление кислорода (ХПК), что стабилизирует процесс. В пилотных условиях недавнее исследование (S. Wang и соавт., 2022) показало, что использование угольной пыли обеспечивает высокие степени извлечения PO_4-P и NH_4-N (до ≈96 и ≈78 % соответственно) при одновременном снижении ХПК порядка 40 %, причем эффективность чувствительна к дозе затравки и режиму перемешивания [4]. Одновременно свойства «семян» зависят от сырья и температуры пиролиза: увеличение удельной поверхности и объема пор, а также более выраженная гидрофобность усиливают засевающую способность, укрупняют гранулы и повышают чистоту продукта, это подтверждается в труде N. Krishnamoorthy и соавт., 2023, в кото-

Табл. 1. Примеры веществ, интенсифицирующих образование струвита

Table 1. Examples of substances that intensify the formation of struvite

Вещество (примесь) Substance (impurity)	Условия/концентрация Conditions/concentration	Эффект на образование струвита Effect on struvite formation	Источник Source
Al^{3+} (ион алюминия) (aluminum ion)	~6 мг/л / mg/l	Увеличение степени осаждения фосфора с ~32 до 67 %; коагуляция и укрупнение кристаллов струвита Increase in the degree of phosphorus precipitation from ~32 to 67 %; coagulation and coarsening of struvite crystals	[2]
Твердые частицы (микропластик, ПЭТ) Solid particles (microplastics, PET)	~30 мг/л / mg/l	Ускорение зародышеобразования и роста струвита ~ в 1,4 раза; формирование более крупных и правильных кристаллов Acceleration of nucleation and growth of struvite by ~ 1.4 times; formation of larger and more regular crystals	[3]
SO_4^{2-} (сульфат-ион) (sulfate ion)	SO_4/PO_4 = 2 (молярно) (molar)	Рост эффективности осаждения фосфатов до ~42 % (оптимум); при дальнейшем увеличении эффект снижается Increase in phosphate precipitation efficiency up to ~42 % (optimum); with further increase, the effect decreases	[2]
Биоуголь (угольная пыль) Biochar (coal dust)	0,3–0,5 г/л для снятия ХПК; 2 г/л для затравки 0.3–0.5 g/L for COD removal; 2 g/L for seeding	Рост эффективности осаждения фосфатов и аммонийного азота до ~78 и ~96 % соответственно Increase in the efficiency of precipitation of phosphates and ammonium nitrogen to ~78 and ~96 %, respectively	[4, 5]

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

ром системно сопоставлены различные типы биоугля и показана необходимость подбора материала под конкретную матрицу СВ [5].

Помимо указанных примеров, на процесс образования струвита могут благотворно влиять определенные неорганические анионы в умеренных количествах. Хотя в большинстве случаев конкурирующие анионы рассматриваются как ингибиторы (например, сульфат, карбонат), некоторые исследования отмечали наличие оптимальных диапазонов концентраций, при которых добавки таких анионов слегка повышают эффективность осаждения фосфора. В частности, добавление сульфат-ионов (SO_4^{2-}) в реакционную среду в эксперименте по кристаллизации струвита привело к повышению степени осаждения фосфатов с ~32 % (без сульфата) до ~42 % при молярном соотношении $SO_4/PO_4 = 2$ [2]. Предполагается, что сульфат может влиять на ионную силу раствора или конкурировать за гидратацию, что при определенных условиях способствует выпадению струвита. Однако при дальнейшем увеличении концентрации SO_4^{2-} положительный эффект исчезает и эффективность осаждения вновь снижается.

В целом интенсифицирующее влияние вторичных веществ наблюдается сравнительно редко и, как правило, проявляется в узком диапазоне концентраций. Тем не менее принятие в расчет этих факторов может быть использовано для целенаправленной модификации процессов, например, введения специальных добавок или материалов-носителей, способствующих ускорению роста кристаллов струвита и укрупнению осадка. В табл. 1 приведена сводная информация об интенсифицирующем влиянии различных примесей на скорость осаждения струвита.

Вещества, ингибирующие образование струвита

Значительно более широким является перечень примесей, отрицательно влияющих на кристаллизацию струвита. Ингибирующее действие могут оказывать как неорганические катионы, например щелочные, щелочноземельные и тяжелые металлы, так и различные анионы и органические вещества, присутствующие в СВ. Механизмы ингибирования разнообразны: некоторые ионы вступают в конкурирующие реакции осаждения, отнимая фосфат или магний из раствора и образуя другие твердые фазы; другие примеси адсорбируются на поверхности зарождающихся кристаллов, замедляя их рост; высокомолекулярные органические вещества могут комплексировать ионы или покрывать зародыши, препятствуя кристаллизации.

Наиболее известный ингибитор кристаллизации струвита — кальций. Ионы Ca^{2+} присутствуют во многих видах СВ, например, в свиноводческих стоках, в некоторых промышленных выщелачивающих растворах. В значительных концентрациях ионы кальция способны резко изменить состав выпадающего осадка. Кальций конкурирует с магнием и фосфатом, образуя собственные труднорастворимые соли (фосфаты кальция различной стехиометрии — гидроксилапатит $Ca_5(PO_4)_3OH$, трикальцийфосфат $Ca_3(PO_4)_2$, дикальцийфосфат и др.) [6, 7]. При повышенном содержании Ca^{2+} доля струвита в осадке резко падает. Экспериментально установлено, что при отношениях Ca:Mg, близких к 1:1 (по молям), кристаллизация струвита практически полностью подавляется — все фосфаты уходят в кальцийсодержащие фазы. Так, в опытах H. Yan и K. Shih (2016) добавление эквимолярного к магнию количества Ca^{2+} приводило к исчезновению характерных пиков струвита на рентгенограммах осадка, что указывает на отсутствие струвитной фазы [6]. Вместо струвита образуются аморфные и кристаллические фосфаты кальция, а также гидроксид магния; содержание осадка по фосфору может оставаться высоким, но форма связанного фосфора не соответствует струвиту. Таким образом, присутствие кальция служит серьезным препятствием для осаждения струвита в кальцийсодержащих сточных водах. Требуется предварительно удалять кальций или применять специальные меры для селективного осаждения, например, проводить двухстадийный процесс с удалением Ca^{2+} на первой стадии.

Аналогичным кальцию образом мешают образованию струвита ионы трехвалентного железа Fe^{3+}. Железо, особенно в форме $FeCl_3$, часто присутствует в СВ из-за его высокой эффективности в качестве коагулянта и дефосфотанта [8]. Fe^{3+} при нейтральных и слегка щелочных pH почти полностью гидролизуется до $Fe(OH)_3$, при этом фосфат-анион способен взаимодействовать с гидроксидом железа, образуя аморфные ферумфосфаты (например, $FePO_4 \times \times xH_2O$) [9]. В результате конкурентного осаждения железо практически полностью отбирает анионы фосфата при реакции получения струвита. Экспериментально показано, что добавки Fe^{3+} существенно замедляют скорость роста струвитных кристаллов и снижают выход струвита [6, 10]. При повышенных дозах Fe^{3+} в осадке вместо струвита преобладают соединения железа и фосфора. Так, при pH 7,5–9 введение Fe^{3+} приводило к практически полному переходу фосфора в железосодержащие фазы, тогда как струвит либо не образовывался, либо выпадал в незначительных количествах. Лишь при очень малых концентрациях Fe (1–3 мг/л) в осадке фиксировались заметные примеси струвитной фазы наряду с основными продуктами — фосфатами кальция или железа. Таким образом, железо, подобно кальцию, является сильным ингибитором кристаллизации струвита. В промышленных условиях это требует контроля: например, минимизации дозировок железосодержащих коагулянтов или полной замены на алюмосодержащие коагулянты, которые не смещают pH в кислую среду и создают дополнительное

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

содержание ионов алюминия, улучшающее качество осаждения струвита.

Помимо Ca^{2+} и Fe^{3+}, ингибирующими для струвита служат многие другие металл-ионы, особенно тяжелые металлы. Ионы Cu^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+}, Cr^{3+} и других могут встраиваться в решетку струвита или адсорбироваться на поверхности кристаллов, нарушая их нормальный рост [2, 10, 11]. В результате скорость кристаллизации снижается, а образующиеся кристаллы имеют дефекты (трещины, изломы) и меньший размер. Например, исследование влияния ионов меди и цинка показало, что при концентрациях всего ~5 мг/л эти ионы замедляют скорость образования струвита на ~20–25 % [10]. В экспериментальных условиях без примесей скорость кристаллизации (первый порядок по пресыщению) составляла ~4,18 $ч^{-1}$, тогда как при добавке 5 ppm Zn^{2+} она упала до ~3,13 $ч^{-1}$. Ионы Cu^{2+} вызвали схожее замедление: при 5 ppm Cu^{2+} константа скорости снизилась до ~3,58 $ч^{-1}$. Максимальный ингибирующий эффект (25%-ное замедление) наблюдался для Zn^{2+} ~5 мг/л. В присутствии тяжелых металлов отмечается также изменение морфологии кристаллов струвита — на их поверхности возникают трещины и шероховатости, что связывают с включением чужеродных ионов в решетку и возникновением локальных напряжений. В практическом плане это и обратное свойство: Cu^{2+} и Zn^{2+} могут выступать в качестве естественных антискалантов для предотвращения образования отложения струвита на технологическом оборудовании или трубопроводах. Однако в контексте целенаправленного осаждения струвита (с целью извлечения питательных элементов) присутствие таких металлов нежелательно, так как снижает скорость и выход продукта, а также приводит к его загрязнению тяжелыми металлами [11].

Отдельно следует отметить влияние кадмия и некоторых других ионов, которые могут вызывать образование побочных аморфных фаз. Кадмий Cd^{2+} редко присутствует в СВ в значимых количествах, однако может встречаться в ливневых стоках или в особых случаях, например, вытяжки из некоторых осадков. В опытах по осаждению струвита добавление Cd^{2+} приводило к появлению в осадке помимо струвита неопознанной аморфной фазы, состав которой, исходя из РФА и ЭДС-анализа, включал Cd, Ca и P. Эта фаза становилась заметной уже при 10 мг/л Cd^{2+} и усиливалась при увеличении концентрации кадмия. Индукционный период и pH начала осаждения при этом практически не изменялись, т.е. зарождение струвита не замедлялось сильно, однако общая доля фосфора, ушедшего в струвит, снижалась при высоких концентрациях Cd. По измеренным данным, при 10 мг/л Cd^{2+} степень удаления фосфатов достигала ~35,5 %, а при дальнейшем увеличении Cd выход по фосфору снижался. Это объясняется тем, что часть фосфата связывается в аморфном осадке кадмий-кальций-фосфата, обедняя струвитную фазу магнием (ЭДС показал понижение содержания Mg в осадке при 100 мг/л Cd). Таким образом, кадмий и подобные ему примеси приводят к образованию побочных фаз и сокращению выхода струвита, хотя явного торможения кинетики (как у Cu, Zn) может и не наблюдаться до определенного предела.

Среди неорганических анионов влияние на кристаллизацию струвита наиболее заметно у карбоната (CO_3^{2-}) и упомянутого ранее сульфата (SO_4^{2-}). Наличие в растворе карбонатной системы (например, высокое содержание растворенного неравновесного CO_2 или щелочных карбонатов) может приводить к буферированию pH и образованию осадков карбоната магния (магнезита $MgCO_3$ или гидромагнезита), особенно при повышенных pH и интенсивной аэрации [2]. Это, в свою очередь, снижает доступность Mg^{2+} для образования струвита. Кроме того, ионы карбоната конкурируют с фосфатом за катионы Mg^{2+} и Ca^{2+}. В результате скорость и степень осаждения струвита могут снижаться. Отмечено, что присутствие карбонат-ионов несколько увеличивает индукционный период образования струвита, хотя этот эффект не столь значителен, как влияние других факторов. Сульфат-ион, как обсуждалось ранее, в малых количествах практически не влияет на фазовый состав (осадок остается струвитом при соотношении SO_4/PO_4 до 8), однако повышает индукционное время и несколько снижает скорость роста кристаллов. При высоких концентрациях сульфата (значительно превышающих концентрацию фосфата) наблюдается общее снижение эффективности осаждения фосфора, хотя явного образования новых фаз не фиксируется. Вероятно, это связано с увеличением ионной силы раствора и экранированием взаимодействий между реагирующими ионами.

Существенное ингибирующее действие на струвит оказывают различные органические примеси, особенно высокомолекулярные и комплексообразующие вещества [12]. В высококонцентрированных СВ (например, в анаэробно обработанных стоках животноводческих ферм, на свалочных фильтратах) содержатся значительные количества растворенного органического вещества: гумусовые кислоты, продукты разложения белков (аминокислоты, альбумины), полиферментные остатки, поверхностно-активные вещества и др. Эти органические соединения могут взаимодействовать с ионами Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{3+}, образуя прочные комплексы и понижая эффективную концентрацию реагентов для струвита. Кроме того, органика адсорбируется на поверхностях кристаллов, блокируя центры кристаллизации. В исследовании R.F. Chen и соавт. (2021) при оценивании влияния модельных органических веществ (бычий сывороточный альбумин — как представитель белков; натриевая соль альгината — как модель полисахарида [13]; гуминовая кислота — как модель гумусовых веществ)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

было выявлено значительное снижение эффективности осаждения струвита при увеличении концентрации органики. Например, комбинация высоких концентраций альбумина (500 мг/л), альгината (500 мг/л) и гумусовой кислоты (1500 мг/л) практически полностью подавила образование струвита при pH 7: за 50 мин реакции удаление фосфатов составило лишь ~7,6 %, тогда как в отсутствии органики за то же время удаляется >90 % фосфора [14, 15]. При этом чистота осадка по струвиту также падает — в присутствии органики в осадке образуются побочные соединения (например, фосфат магния без аммония — минерал ньюбериит ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$), как показано для гумусовых кислот) [16].

Органические кислоты могут подкислять локальную среду осаждения, также способствуя образованию ньюбериита вместо струвита [17]. Для частичной нейтрализации ингибирующего действия органики эффективным оказывается повышение pH: так, при увеличении начального pH с 7 до 8 в системе с высокой концентрацией органических веществ степень удаления фосфора за 50 мин возрастает с 7,6 до 53 %, а за 100 мин достигает ~87 %. Тем не менее даже при pH 8 осадок в присутствии гуминовых кислот был загрязнен посторонними фазами, а доля чистого струвита оставалась ниже, чем в контроле без органики. Таким образом, присутствие значительных количеств растворенной органики — серьезный фактор, тормозящий кристаллизацию струвита и ухудшающий качество получаемого продукта. Этот эффект необходимо учитывать при применении технологического процесса получения струвита на реальных объектах, таких как сточные воды животноводства, возвратные потоки городских очистных сооружений, свалочные фильтраты и другие, где концентрация органических примесей находится на высоких уровнях [1, 3, 17].

Растворенный CO_2 выступает ингибитором кристаллизации струвита за счет смещения углекислотно-карбонатного равновесия в сторону H_2CO_3/HCO_3^-, он понижает pH и тем самым уменьшает долю основ́ных форм фосфата (HPO_4^{2-}/PO_4^{3-}) и аммиака (NH_3). Экспериментально показано, что при низком исходном pH образование струвита не наблюдается (для pH <6,5 — отсутствие осадка) [3]. Удаление растворенного CO_2 из раствора воздушной продувкой повышает pH и снимает этот ингибирующий эффект, инициируя осаждение, причем скорость и выход зависят от расхода воздуха [18]. Такой же механизм подтвержден для СВ: стриппинг CO_2 увеличивает пересыщение и позволяет извлекать фосфор струвитом без дозирования щелочи [19]. Обзор по управлению кристаллизацией указывает CO_2-стриппинг как технологическую альтернативу щелочному подъему pH и электролизу именно для преодоления кислотного (pH-зависимого) ингибирования, вносимого растворенным CO_2.

Широкий спектр вторичных веществ, присутствующих в СВ, оказывает ингибирующее влияние на интенсивность образования струвита и на его чистоту. Принятие в расчет этих веществ и соединений может быть использовано для создания процессов предварительной подготовки сточных вод для снятия ингибирующего воздействия вторичных веществ, например, введение специальных веществ, удаляющих или высаживающих в осадок ингибирующие загрязнители. В табл. 2 приведена сводная информация об ингибирующем влиянии различных примесей на скорость осаждения струвита.

Табл. 2. Примеры ингибирующего влияния различных примесей на кристаллизацию струвита

Table 2. Examples of the inhibitory effect of various impurities on the crystallization of struvite

Ингибирующий фактор Inhibitory factor	Условия/концентрация Conditions/concentration	Наблюдаемый эффект Observed effect	Источник Source
Ca^{2+} (кальций) (calcium)	Ca:Mg ≥ 1:1 (молярно) (molar)	Полное вытеснение струвита фосфатами кальция. Невозможность проведения процесса Complete displacement of struvite by calcium phosphates. Impossibility of carrying out the process	[6, 9]
Fe^{3+} (железо) (iron)	Fe:Mg ≈ 1:5	Снижение скорости роста струвита; преобладание фосфатов железа в осадке, деформация кристаллов струвита Decrease in the rate of struvite growth; predominance of iron phosphates in the sediment, deformation of struvite crystals	[6, 9]
Cu^{2+}/Zn^{2+} (тяжелые металлы) (heavy metals)	~5 ppm ≈ (5 мг/л) (mg/l)	Замедление скорости кристаллизации на ~20–25 %; образование дефектных, растрескавшихся кристаллов Slowing down the crystallization rate by ~20–25 %; formation of defective, cracked crystals	[10, 11]

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Ингибирующий фактор Inhibitory factor	Условия/концентрация Conditions/concentration	Наблюдаемый эффект Observed effect	Источник Source
Cd^{2+} (кадмий) (cadmium)	>10 мг/л / mg/l	Образование побочной аморфной Cd-Ca-P фазы; снижение доли струвита и эффективности удаления фосфора Formation of a secondary amorphous Cd-Ca-P phase; reduction in the proportion of struvite and the efficiency of phosphorus removal	[2]
Органические вещества (альбумин, альгинат, гумусовые кислоты) (составляющие ХПК) Organic matter (albumin, alginate, humic acids) (COD components)	0–1,5 г/л / g/l	Сильное удлинение индукционного периода; при высоких концентрациях — полное подавление осаждения струвита при нейтральном pH, выпадение других фосфорных осадков (ньюбериит, фосфаты и гидроксиды металлов) Strong extension of the induction period; at high concentrations — complete suppression of struvite precipitation at neutral pH, precipitation of other phosphorus precipitates (Newberyite, metal phosphates and hydroxides)	[1, 3, 14–17]
Na^{+} (натрий, натриевые соли) (sodium, sodium salts)	>5 мг/л / mg/l	Увеличение индукционного периода, замедление образования кристаллов (при прочих равных условиях) Increasing the induction period, slowing down the formation of crystals (all other things being equal)	[12, 13]
CO_3^{2-}/HCO_3^{-} (карбонатная система) (carbonate system)	Высокая буферная щелочность High buffer alkalinity	Буферирование pH, конкуренция за Mg^{2+}; возможна потеря Mg в виде $MgCO_3$, снижение выхода струвита pH buffering, competition for Mg^{2+}; possible loss of Mg as $MgCO_3$, decreased struvite yield	[12]
SO_4^{2-} (сульфат) (sulfate)	Избыток (SO_4/PO_4 >> 1) Excess	Увеличение индукционного периода, небольшое снижение степени осаждения фосфора (без образования новых фаз) Increase in the induction period, slight decrease in the degree of phosphorus precipitation (without the formation of new phases)	[2, 12]
CO_2 (углекислый газ) (carbon dioxide)	В любых концентрациях, смещающих pH <6,5 At any concentrations that shift pH <6.5	Невозможность образования струвита при низких значениях pH, потребность в дозировании щелочи Inability to form struvite at low pH values, requiring alkali dosing	[18, 19]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллизация струвита — эффективный метод извлечения азота и фосфора из СВ, однако наличие вторичных компонентов в высококонцентрированных стоках значительно влияет на процесс. Обзор показывает, что ионы кальция, железа, тяжелые металлы, карбонаты, сульфаты и растворенные органические вещества могут ингибировать образование струвита. Они либо вступают в конкуренцию, образуя другие труднорастворимые осадки, либо тормозят рост кристаллов через комплексообразование, адсорбцию или повышение ионной силы. Это снижает скорость кристаллизации, выход продукта и его качество. В то же время некоторые вещества стимулируют кристаллизацию или улучшают свойства осадка — например, малые дозы коагулянтов (Al^{3+}), дисперсные частицы как центры кристаллизации, а также оптимальный ионный состав. Использование таких факторов позволяет адаптировать технологию под разные сточные воды.

Практически это требует предварительной подготовки СВ перед осаждением струвита — удаления или маскировки ингибиторов: декальцинации (снижения Ca^{2+}), удаления или окисления железа, осаждения тяжелых металлов, коагуляции для устранения растворенной органики. Биологические процессы, например анаммокс, при правильном контроле могут удалять избыток органики и карбонатов, а также аммоний, создавая условия для эффективной кристаллизации [20].

Требуются дальнейшие экспериментальные исследования для уточнения оценки влияния каждого фактора в различных системах при осаждении струвита. Полученные новые данные целесообразно

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

интегрировать в математические модели осаждения струвита, чтобы учесть влияние вторичных компонентов на стадии проектирования технологий. Таким образом, учет ингибирующих и интенсифицирующих примесей при модификации метода кристаллизации струвита позволит повысить эффективность и стабильность процессов восстановления азота и фосфора из высококонцентрированных сточных вод, обеспечивая получение более чистого и ценного в агрохимическом отношении струвита.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Kozik A., Hutnik N., Piotrowski K., Mazienczuk A., Matynia A.* Precipitation and crystallization of struvite from synthetic wastewater under stoichiometric conditions // Advances in Chemical Engineering and Science. 2013. Vol. 3. Issue 4. Pp. 20–26. DOI: 10.4236/aces.2013.34B004

2. *Saidou H., Korchef A., Moussa S.B., Amor M.B.* Study of Cd^{2+}, Al^{3+}, and SO_4^{2-} ions influence on struvite precipitation from synthetic water by dissolved CO_2 degasification technique // Open Journal of Inorganic Chemistry. 2015. Vol. 5. Issue 3. Pp. 41–51. DOI: 10.4236/ojic.2015.53006

3. *Yan J., Ma M., Li F.* Phosphorus recovery via struvite crystallization in batch and fluidized-bed reactors: Roles of microplastics and dissolved organic matter // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 476. P. 135108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135108

4. *Wang S., Sun K., Xiang H., Zhao Z., Shi Y., Su L. et al.* Biochar-seeded struvite precipitation for simultaneous nutrient recovery and chemical oxygen demand removal in leachate: From laboratory to pilot scale // Frontiers in Chemistry. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fchem.2022.990321

5. *Krishnamoorthy N., Nzediegwu C., Mao X., Zeng H., Paramasivan B., Chang S.X.* Biochar seeding properties affect struvite crystallization for soil application // Soil & Environmental Health. 2023. Vol. 1. Issue 2. P. 100015. DOI: 10.1016/j.seh.2023.100015

6. *Yan H., Shih K.* Effects of calcium and ferric ions on struvite precipitation: A new assessment based on quantitative X-ray diffraction analysis // Water Research. 2016. Vol. 95. Pp. 310–318. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.032

7. *Aleta P., Parikh S.J., Silchuk A.P., Scow K.M., Park M., Kim S.* The effect of organic matter on the removal of phosphorus through precipitation as struvite and calcium phosphate in synthetic dairy wastewater // Membrane Water Treatment. 2018. Vol. 9. Issue 3. Pp. 163–172. DOI: 10.12989/mwt.2018.9.3.163

8. *Wu Y., Li J., Ma J., Xu L., Song X., Ding J. et al.* Effects of ferric chloride on waste activated sludge and slaughterhouse waste anaerobic co-digestion // Renewable Energy. 2025. Vol. 239. P. 122121. DOI: 10.1016/j.renene.2024.122121

9. *Perwitasari D.S., Muryanto S., Schmahl W.W., Jamari J., Bayuseno A.P.* A kinetic and structural analysis of the effects of Ca- and Fe ions on struvite crystal growth // Solid State Sciences. 2022. Vol. 134. P. 107062. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2022.107062

10. *Muryanto S., Bayuseno A.P.* Influence of Cu^{2+} and Zn^{2+} as additives on crystallization kinetics and morphology of struvite // Powder Technology. 2014. Vol. 253. Pp. 602–607. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.12.027

11. *Wang W., Xin X., Li B., Huang H., Liu X., Song L. et al.* Effect of organics on Cu and Cr in recovered struvite from synthetic swine wastewater // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 360. P. 132186. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132186

12. *Kabdaşlı I., Parsons S.A., Tünay O.* Effect of major ions on induction time of struvite precipitation // Croatica Chemica Acta. 2006. Vol. 79. Issue 2. Pp. 243–251.

13. *Dewar A.B., Mack G.E., Swansburg K.B.* Effect of sodium hexametaphosphate on quality and the development of struvite in “chicken haddie” // Technical Report No. 6. Halifax (NS) : Applied Research and Development Laboratory, Inspection Branch, Department of Fisheries and Forestry; Ottawa : Queen’s Printer for Canada, 1970. 22 p.

14. *Chen R.F., Liu T., Rong H.W., Zhong H.T., Wei C.H.* Effect of organic substances on nutrients recovery by struvite electrochemical precipitation from synthetic anaerobically treated swine wastewater // Membranes. 2021. Vol. 11. Issue 8. P. 594. DOI: 10.3390/membranes11080594

15. *Wei L., Hong T., Cui K., Chen T., Zhou Y., Zhao Y. et al.* Probing the effect of humic acid on the nucleation and growth kinetics of struvite by constant composition technique // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 378. P. 122130. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122130

16. *Zhang Q., Zhao S., Ye X., Xiao W.* Effects of organic substances on struvite crystallization and recovery // Desalination and Water Treatment. 2016. Vol. 57. Issue 23. Pp. 10924–10933. DOI: 10.1080/19443994.2015.1040850

17. *Song Y., Dai Y., Hu Q., Yu X., Qian F.* Effects of three kinds of organic acids on phosphorus recovery by magnesium ammonium phosphate (MAP) crystallization from synthetic swine wastewater // Chemosphere. 2014. Vol. 101. Pp. 41–48. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.019

18. *Saidou H., Korchef A., Ben Moussa S., Ben Amor M.* Struvite precipitation by the dissolved CO_2 degasification technique: Impact of the airflow rate and pH // Chemosphere. 2009. Vol. 74. Issue 2. Pp. 338–343. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.09.081

19. *Korchef A., Saidou H., Ben Amor M.* Phosphate recovery through struvite precipitation by CO_2 removal: Effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 186. Issue 1. Pp. 602–613. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.045

20. *Hassan P., Mavinic D.S., Rezania B., Kelly H., Lo K.V.* ANAMMOX combined with struvite crystallization: A sustainable solution for nitrogen and phosphorus removal and recovery from side stream processes // Proceedings of the Water Environment Federation. 2013. Issue 4. Pp. 318–327. DOI: 10.2175/193864713-813525572

Поступила в редакцию 19 сентября 2025 г.
Принята в доработанном виде 28 сентября 2025 г.
Одобрена для публикации 28 сентября 2025 г.

Об авторах: **Виталий Сергеевич Липатов** — аспирант кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; vitalylipatov@mail.ru;

Елена Сергеевна Гогина — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; РИНЦ ID: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4893-8922; goginaes@mgri.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kozik A., Hutnik N., Piotrowski K., Mazienczuk A., Matynia A. Precipitation and crystallization of struvite from synthetic wastewater under stoichiometric conditions. *Advances in Chemical Engineering and Science.* 2013; 3(4):20-26. DOI: 10.4236/aces.2013.34B004

2. Saidou H., Korchef A., Moussa S.B., Amor M.B. Study of Cd^{2+}, Al^{3+}, and SO_4^{2-} ions influence on struvite precipitation from synthetic water by dissolved CO2 degasification technique. *Open Journal of Inorganic Chemistry.* 2015; 5(3):41-51. DOI: 10.4236/ojic.2015.53006

3. Yan J., Ma M., Li F. Phosphorus recovery via struvite crystallization in batch and fluidized-bed reactors: Roles of microplastics and dissolved organic matter. *Journal of Hazardous Materials.* 2024; 476:135108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135108

4. Wang S., Sun K., Xiang H., Zhao Z., Shi Y., Su L. et al. Biochar-seeded struvite precipitation for simultaneous nutrient recovery and chemical oxygen demand removal in leachate: From laboratory to pilot scale. *Frontiers in Chemistry.* 2022; 10. DOI: 10.3389/fchem.2022.990321

5. Krishnamoorthy N., Nzediegwu C., Mao X., Zeng H., Paramasivan B., Chang S.X. Biochar seeding properties affect struvite crystallization for soil application. *Soil & Environmental Health.* 2023; 1(2):100015. DOI: 10.1016/j.seh.2023.100015

6. Yan H., Shih K. Effects of calcium and ferric ions on struvite precipitation: A new assessment based on quantitative X-ray diffraction analysis. *Water Research.* 2016; 95:310-318. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.032

7. Aleta P., Parikh S.J., Silchuk A.P., Scow K.M., Park M., Kim S. The effect of organic matter on the removal of phosphorus through precipitation as struvite and calcium phosphate in synthetic dairy wastewater. *Membrane Water Treatment.* 2018; 9(3):163-172. DOI: 10.12989/mwt.2018.9.3.163

8. Wu Y., Li J., Ma J., Xu L., Song X., Ding J. et al. Effects of ferric chloride on waste activated sludge and slaughterhouse waste anaerobic co-digestion. *Renewable Energy.* 2025; 239:122121. DOI: 10.1016/j.renene.2024.122121

9. Perwitasari D.S., Muryanto S., Schmahl W.W., Jamari J., Bayuseno A.P. A kinetic and structural analysis of the effects of Ca- and Fe ions on struvite crystal growth. *Solid State Sciences.* 2022; 134:107062. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2022.107062

10. Muryanto S., Bayuseno A.P. Influence of Cu^{2+} and Zn^{2+} as additives on crystallization kinetics and morphology of struvite. *Powder Technology.* 2014; 253:602-607. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.12.027

11. Wang W., Xin X., Li B., Huang H., Liu X., Song L. et al. Effect of organics on Cu and Cr in recovered struvite from synthetic swine wastewater. *Journal of Cleaner Production.* 2022; 360:132186. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132186

12. Kabdaşlı I., Parsons S.A., Tünay O. Effect of major ions on induction time of struvite precipitation. *Croatica Chemica Acta.* 2006; 79(2):243-251

13. Dewar A.B., Mack G.E., Swansburg K.B. *Effect of sodium hexametaphosphate on quality and the development of struvite in "chicken haddie"*. Technical Report No. 6. Halifax (NS), Applied Research and Development Laboratory, Inspection Branch, Department of Fisheries and Forestry; Ottawa, Queen's Printer for Canada, 1970; 22.

14. Chen R.F., Liu T., Rong H.W., Zhong H.T., Wei C.H. Effect of organic substances on nutrients recovery by struvite electrochemical precipitation from synthetic anaerobically treated swine wastewater. *Membranes.* 2021; 11(8):594. DOI: 10.3390/membranes11080594

15. Wei L., Hong T., Cui K., Chen T., Zhou Y., Zhao Y. et al. Probing the effect of humic acid on the nucleation and growth kinetics of struvite by constant composition technique. *Chemical Engineering Journal.* 2019; 378:122130. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122130

16. Zhang Q., Zhao S., Ye X., Xiao W. Effects of organic substances on struvite crystallization and recovery. *Desalination and Water Treatment.* 2016; 57(23):10924-10933. DOI: 10.1080/19443994.2015.1040850

17. Song Y., Dai Y., Hu Q., Yu X., Qian F. Effects of three kinds of organic acids on phosphorus recovery by magnesium ammonium phosphate (MAP) crystallization from synthetic swine wastewater. *Chemosphere.* 2014; 101:41-48. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.019

18. Saidou H., Korchef A., Ben Moussa S., Ben Amor M. Struvite precipitation by the dissolved CO_2 degasification technique: Impact of the airflow rate and pH. *Chemosphere.* 2009; 74(2):338-343. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.09.081

19. Korchef A., Saidou H., Ben Amor M. Phosphate recovery through struvite precipitation by CO_2 removal: Effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations. *Journal of Hazardous Materials.* 2011; 186(1):602-613. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.045

20. Hassan P., Mavinic D.S., Rezania B., Kelly H., Lo K.V. ANAMMOX combined with struvite crystallization: A sustainable solution for nitrogen and phosphorus removal and recovery from side stream processes. *Proceedings of the Water Environment Federation.* 2013; 4:318-327. DOI: 10.2175/193864713813525572

Received September 19, 2025.
Adopted in revised form on September 28, 2025.
Approved for publication on September 28, 2025.

BIONOTES: **Vitaly S. Lipatov** — postgraduate student of the Department of Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Structures; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; vitalylipatov@mail.ru;

Elena S. Gogina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Structures; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; ID RSCI: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4893-8922; goginaes@mgri.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 697.975
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1728-1743

Применение аккумуляторов холода непосредственного контакта сред в системах кондиционирования воздуха

Александр Иванович Андреев, Александр Евгеньевич Семенов
Астраханский государственный технический университет (АГТУ); г. Астрахань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Выдвинуто предложение использовать аккумуляторы холода для обработки воздуха в системах кондиционирования воздуха (СКВ) зданий и сооружений с целью снижения нагрузки на холодильную машину в пиковых режимах работы, а также для выравнивания нагрузки на оборудование. Проанализирован ряд источников, подтверждающих актуальность исследования и детально освещающих данную тему.
Материалы и методы. Предложены две схемы аккумулятора холода на базе непосредственного контакта сред, а также построены математические модели процесса кристаллизации и аккумуляции. Рассчитаны параметры работы холодильной машины в составе СКВ, проведена оптимизация энергопотребления СКВ методом множителей Лагранжа.
Результаты. Для аккумулирования холода преимущественно рассматривались жидкие среды, прежде всего, растворы солей и фреоны. Анализ источников показал, что аккумуляторы холода с непосредственным контактом сред являются эффективной и перспективной технологией для повышения энергетической эффективности систем хладоснабжения зданий и сооружений. На базе этого выполнен подробный расчет аккумулятора. Построена математическая модель процесса кристаллизации раствора при аккумулировании льда и рассчитаны параметры аккумулятора и холодильной машины. Исследованы две схемы технологии аккумуляции холода в системе холодильной машины СКВ — по способу раздельного получения льда и эжекторная схема. Полученные результаты моделирования показали, что применение новых технологий аккумуляции холода в системах СКВ позволяет снизить энергозатраты на эксплуатацию на 20–30 % и уменьшить первичные капиталовложения. Этот эффект достигается за счет снижения нагрузки на холодильное оборудование при пиковых режимах работы.
Выводы. Полученные данные показали, что предложенные решения аккумулирования холода обладают меньшими энергозатратами по сравнению с аналогами на 20–30 %, а также способны повышать эффективность СКВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аккумулирование холода, охлаждение при непосредственном контакте сред, охлаждение воздуха, система кондиционирования воздуха, система жизнеобеспечения, энергоэффективность системы кондиционирования воздуха

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за рассмотрение и рецензирование работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Андреев А.И., Семенов А.Е.* Применение аккумуляторов холода непосредственного контакта сред в системах кондиционирования воздуха // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1728–1743. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1728-1743

Автор, ответственный за переписку: Александр Иванович Андреев, aresut79@mail.ru.

Application of direct contact cold accumulators in air conditioning systems

Aleksander I. Andreev, Alexander E. Semenov
Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study puts forward a proposal to use cold accumulators for air treatment in air conditioning systems (ACS) of buildings and structures in order to reduce the load on the refrigeration machine during peak operating conditions, as well as to equalize the load on equipment. A number of sources were analyzed, confirming the relevance of the study and covering the topic under study in detail.
Materials and methods. Two schemes of a cold accumulator based on direct contact of media are proposed, and mathematical models of the crystallization and accumulation process are constructed. The operating parameters of the refrigeration machine as part of the ACS are calculated and the energy consumption of the ACS is optimized using the Lagrange multiplier method.
Results. Liquid media, primarily salt solutions and freons, were mainly considered for cold accumulation. Analysis of sources showed that cold accumulators with direct contact of media are an effective and promising technology for increasing

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

© А.И. Андреев, А.Е. Семенов, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

the energy efficiency of refrigeration systems of buildings and structures. Based on this, a detailed calculation of the accumulator was carried out. A mathematical model of the solution crystallization process during ice accumulation was built and the parameters of the accumulator and refrigeration machine were calculated. Two schemes of cold accumulation technology in the refrigeration machine system of the ACS were studied — by the method of separate ice production and an ejector scheme. The obtained modeling results showed that the use of new cold accumulation technologies in ACS systems allows reducing energy costs for operation by 20–30 % and reducing initial capital investments. The economic effect is achieved by reducing the load on the equipment at peak consumption values. This allows us to say that for the design stage it is possible to reduce the equipment power by selecting it based on half-peak values, with compensation using accumulation.
Conclusions. The data obtained showed that the proposed cold storage solutions have lower energy consumption compared to analogues by 20–30 %, and are also capable of increasing the efficiency of ACS.

KEYWORDS: cold storage, contact cooling, air cooling, air conditioning system, life support system, air conditioning system energy efficiency

Acknowledgments. The authors thank the anonymous reviewers for reviewing and evaluating this work.

FOR CITATION: Andreev A.I., Semenov A.E. Application of direct contact cold accumulators in air conditioning systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1728-1743. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1728-1743.

Corresponding author: Aleksander I. Andreev, aresut79@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия — одна из главных потребностей человека для его жизни. Согласно последним исследованиям, свыше 20 % вырабатываемой энергии затрачивается на работу машин и установок, связанных с охлаждением и заморозкой. Большой процент от этого занимают машины климатической техники, прежде всего системы кондиционирования воздуха (СКВ). Из-за глобального потепления системы для поддержания комфортных параметров воздуха получают популярность и показывают быстрый рост спроса. В соответствии с маркетинговым исследованием IEA, возрастание спроса на СКВ и, как следствие, потребности затрат энергии на кондиционирование должно возрасти более чем на 250 % в ближайшие 30 лет. В системе современного здания до 60–80 % всей затрачиваемой мощности уходит на работу систем кондиционирования [1].

Развитие СКВ для зданий и сооружений ставит свои задачи и диктует требования к проектированию, разработке и реализации холодильных машин. Внедрение новых технологий и усовершенствованных конструкций снижает энергозатраты при эксплуатации СКВ, также повышает экологические и экономические показатели [2, 3].

Важнейшим является вопрос экономии энергии на выработку тепла и холода, что связано с высокими ценами на энергоносители в мире, в первую очередь с дефицитом топлива, в частности угля и нефти. Основной путь решения данной проблемы — повышение энергоэффективности систем хладо- и теплоснабжения за счет модернизации существующих и разработки новых технологий, а также использования режимов эксплуатации с наибольшей эффективностью [4].

Поэтому одним из главных направлений снижения энергозатрат на эксплуатацию холодильных установок в системах СКВ служит оптимизация энергопотребления их работы. Применение аккумуляторов холода позволяет снизить мощность СКВ вплоть до 60–80 % [5].

Существующие методы аккумулирования большей частью базируются на накоплении водяного льда [6] либо фазовых переходах различных веществ, например, сублимации сухого льда [7], либо энергии холода СПГ на предприятиях его добычи [8].

Разработка новых методов основывается на снижении затрат на получение хладоемких веществ, в частности на накопление водяного льда. В последние годы появляются методы охлаждения в ходе прямого контакта фаз [9].

В литературе [10] показаны методы накопления и охлаждения при непосредственном контакте фаз, что позволяет говорить о возможности осуществления подобных технологий и их внедрения в промышленности. Поэтому актуален вопрос разработки технологии аккумулирования и ее применения в системах зданий и сооружений. Конечно, такие методы имеют и проблемы [11].

Использование технологии аккумулирования холода в СКВ представлено в ряде работ. Так, в публикации [12] показано применение сезонного холода для повышения эффективности СКВ. Применяемые для холодоснабжения парокомпрессионные холодильные машины имеют относительно невысокий холодильный коэффициент, который при получении температуры холодоносителя на уровне 5–10 °С при температуре окружающей среды 20–30 °С не превышает 2,5–3,5 — это означает, что на 1 кВт затраченной электрической мощности на привод компрессора холодильной машины можно получить лишь 2,5–3,5 кВт холодильной мощности. Сезонное аккумулирование природного холода обеспечивает многократное снижение затрат электроэнергии на холодоснабжение потребителей.

Приведен количественный результат применения аккумулирования холода в СКВ [13]. Использование различных типов аккумуляторов холода для выравнивания нагрузок на холодильные ма-

шины дает возможность снизить их установочные мощности до 40–80 %.

Системы, которые накапливают энергию (тепло и холод) в период избытка и высвобождают ее в момент, когда она нужна, постепенно входят в эксплуатацию. Проблема с этими системами заключается в большом объеме материала, необходимого для хранения энергии. По этой причине были разработаны системы, применяющие фазовый переход для накопления энергии. Хранение энергии может использоваться как для отопления, так и для охлаждения, хранение тепла не представляет проблем. Однако существует проблема с сохранением холода из-за среды, в которой может храниться холод, и самого источника холода. Одним из способов решения последней проблемы является тип холодного аккумулирования PCM (phase change material — материалы с фазовым переходом) с ночной вентиляцией, называемый «свободным охлаждением» [14–17]. Используя уравнение на основании температуры окружающего воздуха T_i (°C) и его скорости v (м/с):

$$t = 214,2 + 6,3T_i - 0,2T_i^2 + 4,0v - 8,4v^2, \quad (1)$$

можно рассчитать время t охлаждения воздуха и, следовательно, производительность аккумулятора-теплообменника для различных скоростей и температур входящего воздуха.

В исследовании [18] показано, что применение аккумуляции холода в СКВ имеет высокую экономическую эффективность, которая возрастает с увеличением мощности установки. Так, при повышении мощности с 1000 до 1400 кВт снижение затрат составляет до 68 %. С. Рахгозар и соавт. [19] получили стоимость проектирования системы аккумулирования холода для офисного здания, проанализировав экономическую целесообразность и оценив дополнительные затраты на установку. В трудах [20–23] также приведены затраты на эксплуатацию и периодический ремонт. Результаты расчета по представленным методикам показывают существенное снижение капитальных затрат на СКВ до 40–50 % при покрытии аккумуляторами холода пиковых нагрузок.

Для повышения энергетической и экономической эффективности рассматриваются новые методы аккумулирования холода. Например, в статье [24] представлено применение пористых поверхностей и наноматериалов для повышения эффективности аккумулирования холода. Добавление гибридных нанопорошков увеличивает скорость замораживания примерно на 7,84 %, а насыщение среды пористой пеной приводит к сокращению аккумулирования примерно на 90,69 %.

В работе [25] показано, что смешивание гибридных наночастиц с фазоизменяющимся материалом (типа SP24E/SP26E) оказывает краткосрочное положительное влияние на производительность кондиционирования воздуха. Максимальная экономия электроэнергии за 2 ч работы составляет для цилиндрической теплообменной поверхности 16,4 %, а за 10 ч работы для пластины — 6,4 %.

Другой путь повышения эффективности аккумулятора холода СКВ — разработка новых методов контакта среды аккумулятора со средой охладителя. В представленной работе рассматриваются вопросы применения нового метода аккумулирования льда при непосредственном контакте фаз, когда хладагент и среда аккумулирования контактируют напрямую. Также приведены расчеты основных компонентов оборудования системы.

Новизна данного исследования заключается в разработке нового метода аккумулирования холода, процессов аккумулирования льда при непосредственном контакте сред, а также применении этого метода для повышения энергетической и экономической эффективности СКВ благодаря покрытию мощности на охлаждение воздуха за счет запасенного холода при пиковых нагрузках на систему.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для повышения эффективности проведено изучение кристаллизации растворов, разработана технология аккумулирования льда, основанная на подаче фреона (октофторциклобутан RC318c) в раствор хлорида натрия; выполнено исследование процесса кристаллизации и образования мелкокристаллического льда, который используется как запас холода.

На рис. 1 изображена конфигурация установки, предназначенной для реализации метода аккумулирования холода [26].

В аккумуляторной установке октофторциклобутан в сжатом состоянии подается в кристаллизационную камеру, где находится раствор хлорида натрия. В ходе испарения охлаждающего агента происходит его непосредственное взаимодействие с солевым раствором, что способствует образованию микроскопических кристаллов льда, которые создают суспензию с раствором.

Далее эта смесь перекачивается насосом в накопительный резервуар. Разделение льда и жидкой фазы осуществляется за счет их различной плотности: лед концентрируется вверху, а раствор отбирается снизу. Отделенный раствор возвращается в кристаллизатор.

Газообразный октофторциклобутан, образовавшийся при испарении в кристаллизаторе, направляется в устройство отделения жидкости, а затем подается в компрессор. В компрессоре происходит его сжатие и нагрев, после чего он поступает в конденсатор, где преобразуется в жидкое состояние и возвращается обратно в кристаллизатор через регулирующий вентиль.

Отвод теплоты от конденсатора осуществляется с помощью охлажденной воды из дополнительного чиллера. Аккумулятор работает в двух режимах — накопления и потребления холода. В процессе на-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

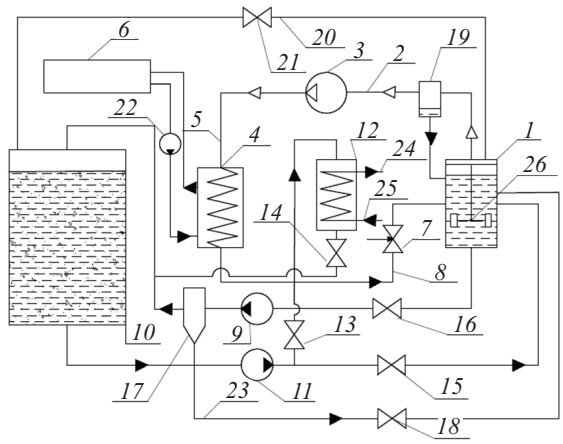


Рис. 1. Аккумулятор холода: *1* — кристаллизатор; *2* — линия всасывания паров хладагента; *3* — компрессор, *4* — конденсатор; *5* — линия нагнетания; *6* — чиллер; *7* — регулирующий вентиль; *8* — жидкостная линия хладагента; *9* — насос смеси раствора и льда; *10* — бак-аккумулятор; *11* — насос возврата раствора; *12* — теплообменник; *13–16*, *18*, *21* — запорные вентили; *17* — гидроциклон; *19* — отделитель жидкости; *20* — линия выравнивания давления; *22* — насос чиллера; *23* — линия возврата фреона; *24*, *25* — линии подачи теплоносителя; *26* — мешалка

Fig. 1. Cold accumulator: *1* — crystallizer; *2* — refrigerant vapor suction line; *3* — compressor; *4* — condenser; *5* — discharge line; *6* — chiller; *7* — regulating valve; *8* — refrigerant liquid line; *9* — solution and ice mixture pump; *10* — accumulator tank; *11* — solution return pump; *12* — heat exchanger; *13–16*, *18*, *21* — shut-off valves; *17* — hydrocyclone; *19* — liquid separator; *20* — pressure equalization line; *22* — chiller pump; *23* — freon return line; *24*, *25* — coolant supply lines; *26* — mixer

копления лед накапливается в баке-аккумуляторе за счет процесса, описанного выше, при этом теплообменник для подачи хладоносителя к потребителю перекрыт. В ходе потребления через теплообменник прокачивается раствор, циркулирующий через бак-аккумулятор и накопившийся лед, при этом перекрыты вентили на кристаллизаторе. Применение в качестве хладагента октофторциклобутана оправданно малыми степенями сжатия, что позволяет снизить энергопотребление и компактность ком-

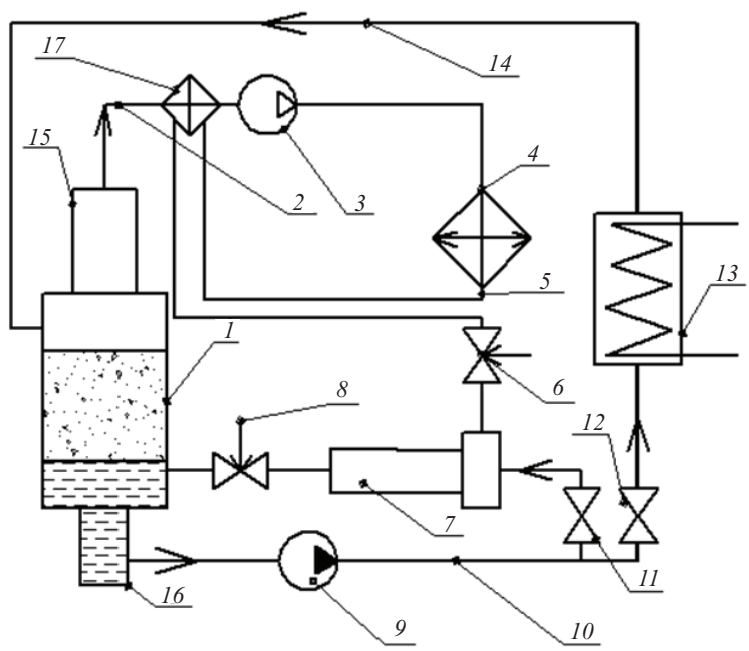


Рис. 2. Аккумулятор холода с эжектором: *1* — кристаллизатор; *2* — линия всасывания паров хладагента; *3* — компрессор; *4* — конденсатор; *5* — линия жидкого хладагента; *6*, *8* — регулирующие вентили; *7* — эжектор; *9* — насос подачи раствора; *10* — линия к потребителю; *11*, *12* — запорные вентили; *13* — теплообменник; *14* — линия возврата раствора; *15* — отделитель жидкости; *16* — отстойник; *17* — рекуператор

Fig. 2. Cold accumulator with ejector: *1* — crystallizer; *2* — refrigerant vapor suction line; *3* — compressor; *4* — condenser; *5* — liquid refrigerant line; *6*, *8* — regulating valves; *7* — ejector; *9* — solution feed pump; *10* — line to consumer; *11*, *12* — shut-off valves; *13* — heat exchanger; *14* — solution return line; *15* — liquid separator; *16* — sump; *17* — recuperator

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

прессора, а также отсутствием газогидратов при кипении в водном растворе (в результате кристаллизации получается водяной лед). Температура кипения –5 °С при давлении 1,05 бар (RC318), температура конденсации 12 °С при давлении 2,017 бар.

Расчет по диаграмме log(P)-I для RC318 показывает, что при производительности установки в 50 кВт накопление льда составляет около 530 кг/ч.

Другой схожий способ аккумулирования на базе тех же процессов [27] представлен на рис. 2.

В основе работы лежит тот же принцип, что и на рис. 1. В режиме накопления вентиль *12* прекращает подачу раствора к теплообменному устройству потребителя. Вместо этого раствор поступает к эжектору через открытый клапан *11*. Хладагент, который выходит из конденсатора, сначала проходит через рекуперативный теплообменник, а затем по жидкостной магистрали с регулирующим клапаном *6* подается в эжектор. В эжекторе он смешивается с раствором и далее направляется в кристаллизатор через регулирующий клапан *8*, где происходит испарение, в результате чего формируется мелкодисперсная смесь льда и раствора. Пары хладагента затем перемещаются в сепаратор жидкости, после чего подаются в компрессор для сжатия и подачи в конденсатор. После конденсации хладагент снова направляется в эжектор, где он вскипает, и затем попадает в кристаллизатор для повторения цикла. Вслед за этим крепкий раствор попадает в отстойник, откуда снова направляется в эжектор *7*. В режиме потребления запорный вентиль *12* открыт, а вентиль *11* закрыт. Раствор подается в теплообменник потребителя, затем отбирает тепло от потребителя и возвращается в кристаллизатор, охлаждаясь за счет накопленного льда.

Предложенные схемы аккумулирования при работе могут быть применены в СКВ, что повышает эффективность системы и выравнивает нагрузку при пиковых режимах работы. Это позволяет снизить мощность оборудования до полупиковых значений. Для описания процесса аккумулирования построена математическая модель кристаллизации раствора с учетом основных параметров сред. Также рассчитаны параметры работы холодильной машины в составе аккумулятора холода. На базе всех проведенных изысканий получена методика оптимизации СКВ методом множителей Лагранжа и термоэкономического анализа. Показано снижение энергозатрат при применении аккумулятора холода при пиковых нагрузках центра обработки данных (ЦОД) с системой охлаждения на базе СКВ мощностью 1 МВт в пиковом режиме работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель процесса аккумулирования в растворе

Расчет и моделирование работы представленного оборудования по схеме 1 (рис. 1) основываются на условиях, что начальная концентрация соли в растворе в кристаллизаторе рассчитывается для получения заданной температуры кипения холодильного агента. Холодильная установка в ночное время может использовать холод от чиллера, что даст значительный экономический эффект.

Построение математической модели базируется на характеристиках водно-солевого раствора в зависимости от начальной концентрации ξ.

Температура замерзания раствора NaCl в воде, °С:

$$t_{\text{зам}} = -0{,}6348\xi + 0{,}064. \quad (2)$$

Удельная теплоемкость раствора NaCl, кДж/(кг·К):

$$C_{\text{раст}} = 3{,}2223\xi^2 - 73{,}964\xi. \quad (3)$$

Плотность раствора NaCl, кг/м^3:

$$\rho(\xi) = 7{,}2605\xi + 999{,}1. \quad (4)$$

На рис. 3 показано изменение основных характеристик раствора в зависимости от концентрации. Интервал моделирования принимался исходя из концентрации от 0 до 12 % исходя из работы аккумуляторов холода.

Давление фреона RC318 в кристаллизаторе $P(t_0)$ в зависимости от температуры кипения, определяющей температуру раствора при кристаллизации, может быть выраженно зависимостью, бар:

$$P(t_0) = 0{,}000855t_0^2 + 0{,}051045t_0 + 1{,}28605. \quad (5)$$

В ходе льдообразования масса жидкости уменьшается с увеличением массы льда, при этом изменяется концентрация раствора и его параметры. Изменение параметров раствора и льда в процессе аккумулирования описывается системой на основании зависимостей (2)–(6):

$$\begin{cases} m_{\text{л}} = \dfrac{m_{\text{р.н}}\varphi}{100}; \\ \xi_{\text{к}} = \xi_{\text{н}}\dfrac{m_{\text{р.н}}}{m_{\text{р.к}}}; \\ m_{\text{NaCl.н}} = 0{,}01\xi_{\text{н}}m_{\text{р.н}};\ m_{\text{NaCl.к}} = 0{,}01\xi_{\text{к}}m_{\text{р.к}}; \\ V_{\text{р.н}} = \dfrac{m_{\text{р.н}}}{\rho(\xi_{\text{н}})};\ V_{\text{р.к}} = \dfrac{m_{\text{р.к}}}{\rho(\xi_{\text{к}})}, \end{cases} \quad (6)$$

где $m_{\text{л}}$ — масса льда, полученная в ходе процесса, кг; $m_{\text{р.н}}$, $m_{\text{р.к}}$ — масса жидкого раствора начальная и конечная в ходе кристаллизации, кг; φ — процент накопления льда, %; $\xi_{\text{к}}$, $\xi_{\text{н}}$ — конечная и начальная концентрация раствора в процессе, %; $m_{\text{NaCl.н}}$, $m_{\text{NaCl.к}}$ — масса растворенной соли начальная и конечная, кг; $V_{\text{р.н}}$, $V_{\text{р.к}}$ — начальный и конечный объем раствора, м^3; $\rho(\xi_{\text{н}})$, $\rho(\xi_{\text{к}})$ — начальная и конечная плотность раствора, кг/м^3.

Моделирование аккумулятора холода и работы холодильной машины

Данные моделирования проведенного для начальной массы раствора 2000 кг по схеме аккумулятора на рис. 1 приведены в табл. 1.

Исходные данные расчета включают начальную концентрацию раствора $\xi_{\text{н}}$ = 3 % (массовая) с массой

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

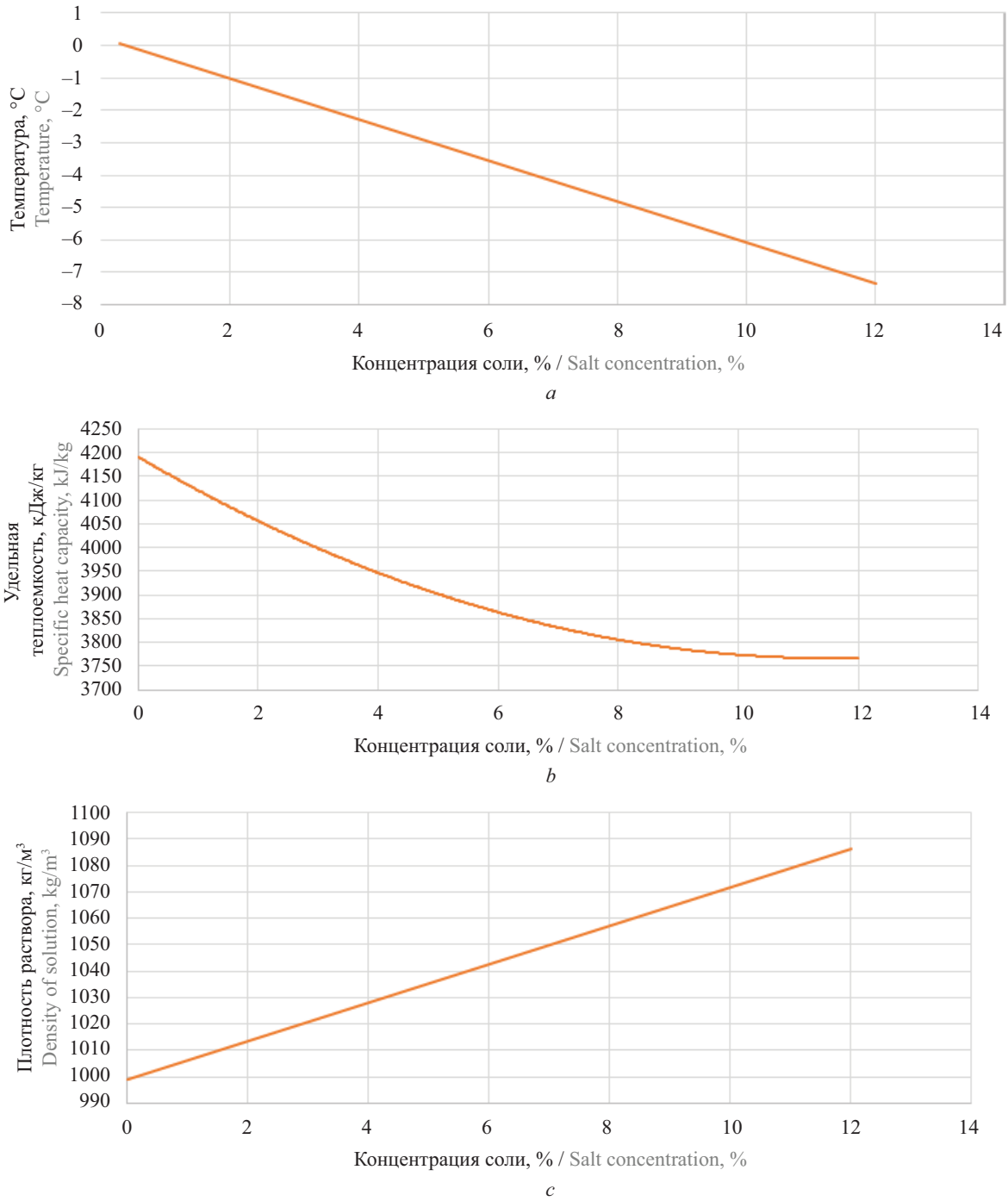


Рис. 3. Изменение температуры (*a*); удельной теплоемкости (*b*) и плотности раствора (*c*) от концентрации

Fig. 3. Change in temperature specific heat capacity (*a*) and solution density (*b*) from concentration (*c*)

раствора $m_{р.н}$ = 2000 кг, процентом накопления льда φ = 75 %; содержание льда в растворе в $\varphi_{см}$ = 10 %; температурный напор ΔT = 0,5; время работы аккумулятора в режиме накопления τ = 6 ч; теплота льдообразования r = 334 кДж/кг; холодопроизводительность q = 400 кВт/м³; диаметр кристаллизатора D = 0,5 м; диаметр аккумулятора $D_{ак}$ = 2 м.

Наиболее важными для эксплуатации являются характеристики раствора и работы холодильной машины, что определяется температурой подаваемого хладагента и концентрацией раствора. Также важную роль играет теплоемкость раствора, подаваемого в теплообменник потребителя. Модель раствора на основании температуры и концентрации может быть описана уравнением Майера – Келли и уравнением (3).

С целью построения модели системы аккумулятора также велось моделирование работы холодильной машины для осуществления цикла подачи хладагента в кристаллизатор.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Табл. 1. Параметры процесса аккумулирования

Table 1. Parameters of the accumulation process

Параметр / Parameter	Значения параметра Parameter values
Масса аккумулируемого льда, кг / Mass of accumulated ice, kg	1500
Конечная масса раствора, кг / Final mass of solution, kg	500
Количество растворенной соли в растворе, кг / Amount of dissolved salt in solution, kg	60
Конечная концентрация раствора NaCl, % / Final concentration of NaCl solution, %	12
Плотность раствора при температуре 10 °С при начальной концентрации, кг/м³ Density of solution at 10 °C at initial concentration, kg/m³	1021
Плотность раствора при температуре 10 °С при конечной концентрации, кг/м³ Density of solution at 10 °C at final concentration, kg/m³	1086
Начальный объем жидкого раствора, м³ / Initial volume of liquid solution, m³	1,959
Конечный объем жидкого раствора, м³ / Final volume of liquid solution, m³	0,46
Конечный объем льда, м³ / Final volume of ice, m³	1,636

Температуры замерзания принималась исходя из изменения концентрации по выражению (2): начальная температура $t_{нач} = -1{,}206$ °С; конечная температура $t_{кон} = -5{,}014$ °С. Согласно формуле (3), начальная теплоемкость $C_{нач} = 4056$ Дж/(кг·К); конечная теплоемкость $C_{кон} = 3806$ Дж/(кг·К); разность температур кипения фреона и кристаллизации в растворе $t_0 = 0{,}5$ К:

$$\Delta t = t_0 - t_{зам} \approx 0{,}5. \quad (7)$$

Начальная температура кипения фреона, °С:

$$t_{0.нач} = t_{нач} - \Delta T_0 = -1{,}71. \quad (8)$$

Конечная температура кипения фреона, °С:

$$t_{0.кон} = t_{кон} - \Delta T_0 = -5{,}51. \quad (9)$$

Давление фреона, бар, согласно формуле (5), начальное давление $P_{нач} = 1{,}171$, конечное давление $P_{кон} = 0{,}93$.

Расчет параметров работы аккумулятора на основании исходных данных приведен в табл. 2.

На рис. 4 приведен цикл холодильной машины.

При построении цикла принимались индикаторный КПД $\eta_{инд} = 0{,}8$; эффективный КПД $\eta_{эфф} = 0{,}95$; электрический КПД $\eta_{эл} = 0{,}95$.

Значения точек, изображенных на цикле, представлены в табл. 3.

Параметры работы холодильной машины в начале процесса аккумулирования приведены в табл. 4.

Параметры точек цикла *XM* в конце аккумулирования показаны в табл. 5.

Параметры работы холодильной машины в конце аккумулирования приведены в табл. 6.

Температура на входе и выходе из теплообменника потребителя 7–12 °С, время потребления холода 3 ч.

Расход охлажденного раствора через теплообменник, кг/ч:

$$G_{охл.раст} = \frac{M_{лед} r 1000}{c_{раст}(t_{вх} - t_{вых})\tau} = 8379. \quad (10)$$

Табл. 2. Расчетные данные аккумулятора

Table 2. Battery Calculation Data

Параметр / Parameter	Значение / Value
Производительность по льду при времени накопления льда 6 ч в период аккумуляции, кг/ч Ice capacity with ice accumulation time of 6 hours during accumulation period, kg/h	250
Холодопроизводительность установки, кВт / Cooling capacity of the unit, kW	23,30
Расход смеси льда и раствора из кристаллизатора, кг/ч Consumption of ice and solution mixture from the crystallizer, kg/h	2500
Расход раствора, кг/ч / Solution consumption, kg/h	2250
Объем активной части кристаллизатора, м³ / Volume of the active part of the crystallizer, m³	0,06
Объем кристаллизатора, м³ / Volume of the crystallizer, m³	0,38
Длина кристаллизатора, м / Length of the crystallizer, m	0,76
Объем активной части аккумулятора, м³ / Volume of the active part of the accumulator, m³	1,64
Общий объем аккумулятора, м³ / Total volume of the accumulator, m³	2,55
Высота аккумулятора, м / Height of the accumulator, m	3,24

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

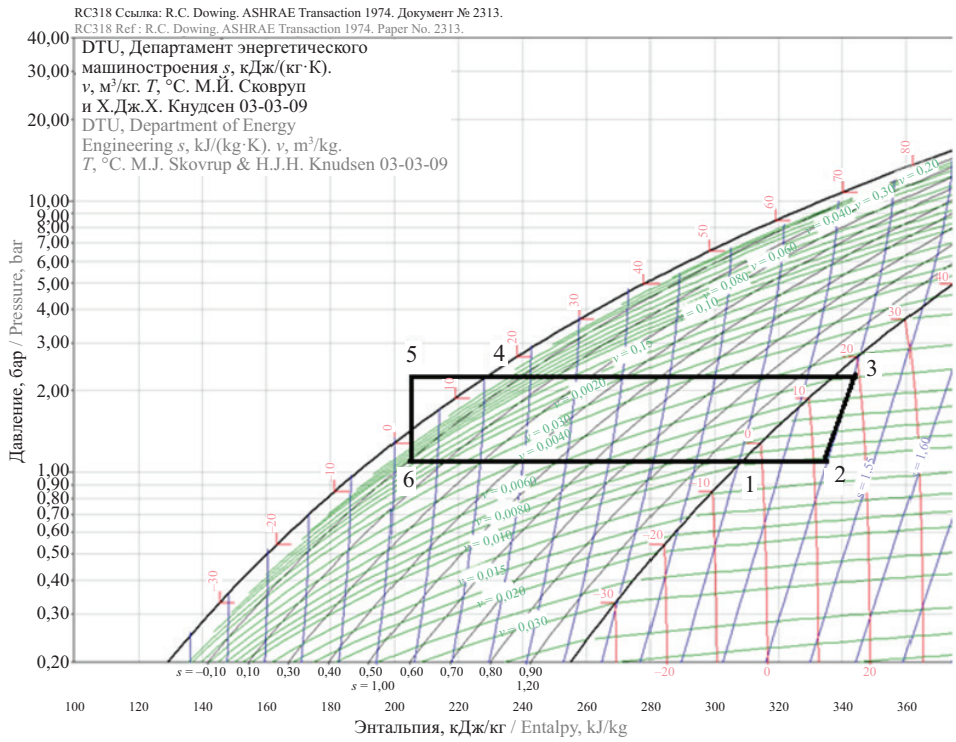


Рис. 4. Диаграмма цикла холодильной машины установки аккумулирования холода

Fig. 4. Diagram of the refrigeration cycle of the cold storage unit

Табл. 3. Параметры точек цикла холодильной машины в начале аккумулирования

Table 3. Parameters of the refrigeration machine cycle points at the beginning of accumulation

Номер точки Number Point	Температура *t*, °C Temperature *t*, °C	Энтальпия *i*, кДж Enthalpy *i*, kJ	Удельный объем *v*, м³/кг Specific volume *v*, m³/kg	Энтропия *s*, Дж/(моль·К) Entropy *s*, J/(mol·K)	Давление *P*, бар Pressure *P*, bar
1	–1,71	311	0,089	1411	1,19
2	28	344	0,104	1582	1,19
3	35	370	0,044	1582	2,66
4	20	344	0,041	1497	2,66
5	20	238	0,001	1132	2,66
6	2,8	205	0,001	1019	1,19

Табл. 4. Параметры работы холодильный машины в начале процесса аккумулирования

Table 4. Parameters of the refrigeration machine operation at the beginning of the accumulation process

Параметр / Parameter	Значение / Value
Удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг / Specific mass refrigeration capacity, kJ/kg	106
Удельная работа сжатия, кДж/кг / Specific mass refrigeration capacity, kJ/kg	25,5
Теоретический холодильный коэффициент / Theoretical coefficient of performance	4,2
Удельная массовая теплота теплообменника, кДж/кг / Specific mass heat of heat exchanger, kJ/kg	32,9
Расход холодильного агента, кг/с / Refrigerant consumption, kg/s	0,22
Теоретическая мощность компрессора, кВт / Theoretical compressor power, kW	5,60
Реальная мощность с учетом КПД, кВт / Actual power taking into account efficiency, kW	7,76
Степень повышения давления / Pressure increase ratio	2,23

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Табл. 5. Параметры точек цикла холодильной машины в конце аккумулирования

Table 5. Parameters of the refrigeration machine cycle points at the end of accumulation

Номер точки Number Point	Температура t, °C Temperature t, °C	Энтальпия i, кДж Enthalpy i, kJ	Удельный объем v, м³/кг Specific volume v, m³/kg	Энтропия s, Дж/(моль·К) Entropy s, J/(mol·K)	Давление P, бар Pressure P, bar
1	–7,55	302	0,111	1388	0,94
2	23	351	0,126	1561	0,94
3	32	363	0,044	1561	2,66
4	20	344	0,044	1497	2,66
5	20	238	0,001	1134	2,66
6	–5,8	189	0,001	960	2,66

Табл. 6. Параметры работы холодильный машины в конце аккумулирования

Table 6. Parameters of the refrigeration machine operation at the end of accumulation

Параметр / Parameter	Значение Value
Удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг / Specific mass refrigeration capacity, kJ/kg	112
Удельная работа сжатия, кДж/кг / Specific mass refrigeration capacity, kJ/kg	12
Теоретический холодильный коэффициент / Theoretical coefficient of performance	9
Удельная массовая теплота теплообменника, кДж/кг / Specific mass heat of heat exchanger, kJ/kg	50
Расход холодильного агента, кг/с / Refrigerant consumption, kg/s	0,21
Теоретическая мощность компрессора, кВт / Theoretical compressor power, kW	2,54
Реальная мощность с учетом КПД, кВт / Actual power taking into account efficiency, kW	3,51
Степень повышения давления / Pressure increase ratio	2,23

На основании проведенного расчета и моделирования проведена оптимизация установки СКВ здания с помощью аккумулятора холода

Оптимизация энергопотребления СКВ с учетом аккумулирования

Использование метода аккумулирования холода способствует снижению энергозатрат на функционирование СКВ. Анализ показал, что применение метода непосредственного контакта между средами (фреон и раствор) обеспечивает более чем 40%-ную экономию энергии по сравнению с традиционными подходами к генерации льда.

С целью оптимизации системы принята схема холодильной машины СКВ, в которой аккумулированный холод используется для покрытия пиковых нагрузок и поддержания температуры в системе (рис. 5). Для обеспечения работы разнообразных компонентов в холодильном оборудовании затрачивается энергетический ресурс, при этом для всестороннего анализа и сравнения процессов переноса энергии служит унифицированный показатель — эксергия.

На основании рис. 5 на рис. 6 показана схема оптимизации, при которой аккумулированный холод подается к потребителям при максимальной (пиковой) нагрузке на СКВ.

В каждой из зон рис. 6 учитываются потери эксергии от входного потока эксергии $E_{вх}$: эксергетические потери e_{11} связаны с работой компрессора, ключевого компонента холодильной машины, отвечающего за циркуляцию хладагента. Эти потери обусловлены механическими потерями в самом компрессоре (трение, утечки), а также неэффективным сжатием хладагента. Потери e_{12} возникают в насосах конденсаторной системы, необходимых для циркуляции охлаждающей жидкости (воды или воздуха) через конденсатор. Данные потери связаны с гидравлическим сопротивлением системы и несовершенством работы насосов. В зоне e_{21} сосредоточены потери в насосах системы охлаждения конденсатора и аккумулятора холода. Потери в этой зоне обусловлены аналогичными факторами, что и в e_{12}. Вентилятор воздухоохладителя e_{31} также вносит вклад в общие потери эксергии из-за неэффективности преобразования электрической энергии в кинетическую энергию потока воздуха, а также вследствие аэродинамического сопротивления. Кристаллизатор и испаритель e_{32} — это компоненты, где происходит фазовый переход хладагента и теплообмен с охлаждаемой средой. Потери здесь связаны с конечной теплопроводностью материалов, наличием температурного напора и несовершенством конструкции теплообменника. Поток эксергии между различными секциями системы характеризуется параметрами e_2 (эксергия, направленная из зоны *1* в зону *2*) и e_3 (эксергия, направленная из зоны *2* в зону *3*). Общая эксергия, поступающая в зоны *2* (E_2) и *3* (E_3), определяется как сумма поставляемой эксергии

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

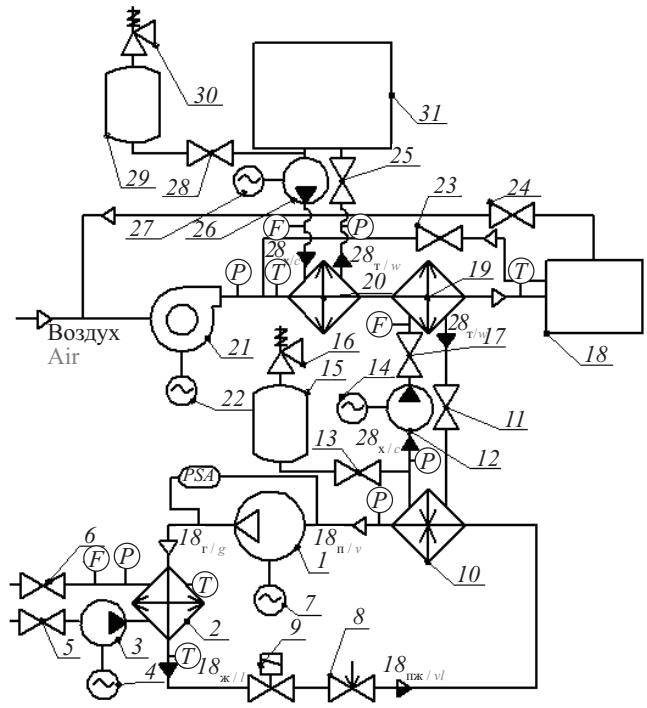


Рис. 5. Схема СКВ с аккумулятором холода: *1* — компрессор; *2* — конденсатор; *3*, *12*, *26* — насосы; *4*, *7*, *14*, *27* — электроприводы; *5*, *6*, *11*, *13*, *17*, *23–25*, *28* — запорные вентили; *8* — регулирующий вентиль; *9* — соленоидный вентиль; *10* — испаритель; *15*, *29* — расширительный бачок; *16*, *30* — предохранительные клапаны; *18* — помещение кондиционирования; *19*, *20* — теплообменники; *21* — приточный вентилятор; *22* — привод вентилятора; *26* — насос; *27* — привод насоса; *31* — аккумулятор холода; *18*г, *18*ж, *18*пж, *18*п — фреон в газовой, жидкостной, парожидкостной и паровой фазе; *28*х, *28*т — холодный и теплый теплоноситель; *T* — датчик температуры; *P* — манометр (датчик давления); *F* — датчик расхода; *PSA* — реле давления

Fig. 5. Scheme of the ACS with a cold accumulator: *1* — compressor; *2* — condenser; *3*, *12*, *26* — pumps; *4*, *7*, *14*, *27* — electric drives; *5*, *6*, *11*, *13*, *17*, *23–25*, *28* — shut-off valves; *8* — regulating valve; *9* — solenoid valve; *10* — evaporator; *15*, *29* — expansion tank; *16*, *30* — safety valves; *18* — air conditioning room; *19*, *20* — heat exchangers; *21* — supply fan; *22* — fan drive; *26* — pump; *27* — pump drive; *31* — cold accumulator; *18g*, *18l*, *18vl*, *18v* — freon in gas, liquid, vapor-liquid and vapor phase; *28c*, *28w* — cold and warm coolant; *T* — temperature sensor; *P* — pressure gauge (pressure sensor); *F* — flow sensor; *PSA* — pressure switch

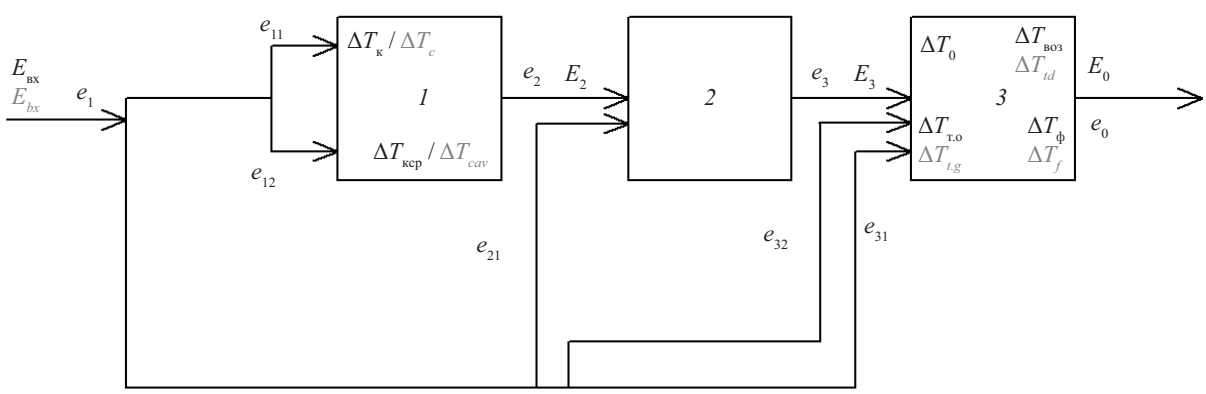


Рис. 6. Термодинамическая схема холодильной установки с дополнительным охлаждением: *1* — основные элементы холодильной машины (такие как компрессор, конденсатор и регулирующий клапан); *2* — теплообменник, обслуживающий потребителя, и насосы циркуляции жидкости; *3* — вспомогательные устройства, испаритель холодильной машины, кристаллизатор и вентиляторы, интегрированные в систему кондиционирования воздуха

Fig. 6. Thermodynamic diagram of a refrigeration unit with additional cooling: *1* — the main elements of the refrigeration machine (such as the compressor, condenser and control valve); *2* — the heat exchanger serving the consumer and the liquid circulation pumps; *3* — auxiliary devices, the evaporator of the refrigeration machine, the crystallizer and the fans integrated into the air conditioning system

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

и эксергии, поступающей извне, с учетом потерь. Приращение эксергии охлаждаемой среды E_0 отражает полезную работу, произведенную холодильной установкой, а e_0 представляет собой эксергию, отданную охлаждающей среде. Разницы температур, такие как $\Delta T_к$ (между хладагентом и охлаждающей средой в конденсаторе), $\Delta T_{кср}$ (средняя разница температур охлаждающей жидкости на входе и выходе конденсатора), $\Delta T_ф$ (перепад температур фреона на входе и выходе теплообменника), $\Delta T_{т.о}$ (температурный градиент в теплообменнике), $\Delta T_{воз}$ (разница температур охлаждающей среды на входе и выходе теплообменника) и ΔT_0 (температурный напор в воздухоохладителе), существенно влияют на термодинамические показатели процесса и потери эксергии, потому расчет оптимума потребления включает в себя и их. В расчете также учитывается температура окружающей среды $T_{о.с}$ и температура необходимого охлаждения $T_{охл}$.

Критерием оптимизации выбрано энергопотребление:

$$U = E_{вх}(e_{11} + e_{12} + e_{21} + e_{32} + e_{31}). \quad (11)$$

Оптимальное потребление энергии достигается при максимальной эффективности с термодинамической точки зрения, когда разница в температурах в процессе теплообмена минимальна:

$$\frac{dU}{d\Delta T_к} = \frac{dU}{d\Delta T_{т.о}} = \\ = \frac{dU}{d\Delta T_0} = \frac{dU}{d\Delta T_{в.о}} = \frac{dU}{d\Delta T_ф} = \frac{dU}{d\Delta T_{кср}} = 0. \quad (12)$$

Потоки эксергий между областями как функции имеют сложный вид:

$$\begin{cases} e_2 = E_2\left(e_3, \Delta T_{т.о}, \Delta T_ф\right) \\ e_3 = E_3(e_2, E_0, \Delta T_0, \Delta T_{воз}) \\ e_0 = E_0(e_2, e_3, Q_0, T_{охл}, T_{о.с}) \end{cases}, \quad (13)$$

где Q_0 — холодопроизводительность системы.

Затрачиваемая на работу аккумулятора энергия направлена на компенсацию пиковых нагрузок. Применяя метод множителей Лагранжа, можно получить уравнения, оптимизирующие этот процесс:

$$\begin{cases} e_{11} = E_{вх}(e_2, \Delta T_к, \Delta T_{кср}) \\ e_{12} = E_{вх}(e_2, \Delta T_к, \Delta T_{кср}) \\ e_{21} = E_{вх}(e_2) \\ e_{31} = E_{вх}(e_0, \Delta T_0, \Delta T_{воз}, \Delta T_{т.о}, \Delta T_ф) \\ e_{32} = E_{вх}(e_0, \Delta T_0, \Delta T_{воз}, \Delta T_{т.о}, \Delta T_ф) \end{cases}. \quad (14)$$

Используем множители Лагранжа:

$$\lambda_1 = \frac{d}{de_0}(E_{вх} + \lambda_3 E_3); \quad (15)$$

$$\lambda_2 = \frac{d}{de_2}(E_{вх}); \quad (16)$$

$$\lambda_3 = \frac{d}{de_3}(E_2 + \lambda_2 E_2), \quad (17)$$

полученные из функции Лагранжа:

$$L = U(\Delta T_к, \Delta T_ф, \Delta T_{т.о}, \Delta T_0, \Delta T_{кср}) + \lambda_1 g_1 + \\ + \lambda_2 g_2 + \lambda_3 g_3, \quad (18)$$

где g_1, g_2, g_3 — ограничения, определенные как:

$$\begin{cases} g_1 : E_2\left(Q_0\right) - E_3\left(Q_0\right) - \Delta E_2 = 0 \\ g_2 : E_3\left(Q_0\right) - \dfrac{Q_0}{T_0}\left(T_{вх} - T_{вых}\right) - \Delta E_3 = 0 \\ g_3 : \Delta T_{т.о} + \Delta T_0 - C = 0 \end{cases}, \quad (19)$$

где C — константа, характеризующая суммарный температурный напор.

Получаем решение для оптимизации, при котором L (лагранжиан) стремится к минимуму, а производные лагранжиана становятся околонулевыми:

$$L = E_{вх}(e_{11}, \Delta T_к) + E_{вх}(e_{12}, \Delta T_{кср}) + \\ + E_2(e_2, e_{21}) + E_3(e_3, \Delta T_0, \Delta T_{воз}) + \\ + E_{вх}(e_{32}, \Delta T_{т.о}) + E_{вх}(e_{31}, \Delta T_ф) \times \\ \times \frac{dL}{d\Delta T_к} = \frac{dL}{d\Delta T_{т.о}} = \frac{dL}{d\Delta T_0} = \\ = \frac{dL}{d\Delta T_{воз}} = \frac{dL}{d\Delta T_ф}. \quad (20)$$

Решение оптимизационной задачи с учетом множителей (15)–(17) имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dL}{d\Delta T_к} = \dfrac{dL}{d\Delta T_{кср}} = \left(\lambda_1 E_{вх} + e_{11} + e_{12}\right) = 0 \\ \dfrac{dL}{d\Delta T_{т.о}} = \left(\lambda_3 E_3 + e_{32} e_{32}\right) = 0 \\ \dfrac{dL}{d\Delta T_ф} = \left(\lambda_2 E_2 + \lambda_3 E_3\right) = 0 \\ \dfrac{dL}{d\Delta T_0} = \left(\lambda_3 E_3 + \lambda_3 E_{вх}\right) = 0 \\ \dfrac{dL}{d\Delta T_{воз}} = \left(E_3 + \lambda_3 E_3\right) = 0 \end{cases}. \quad (21)$$

Решение данного уравнения приводит к минимуму энергозатрат. Оптимизация проводилась в программном пакете Octave. В результате решения системы (21) на основании исходных данных для СКВ производительностью 1 МВт (с учетом вводимой мощности аккумулятора холода) получено решение в виде функции (кривой 3-го порядка):

$$N_{пот} = -3 \cdot 10^{-5} N_{акк}^3 + 0{,}017 N_{акк}^2 - \\ - 3{,}360 N_{акк} + 589{,}034, \quad (22)$$

решение представлено на рис. 7.

Минимум потребляемой электроэнергии системы кондиционирования воздуха для ЦОД составляет 720 кВт и находится при 200 кВт мощности льдоаккумулятора.

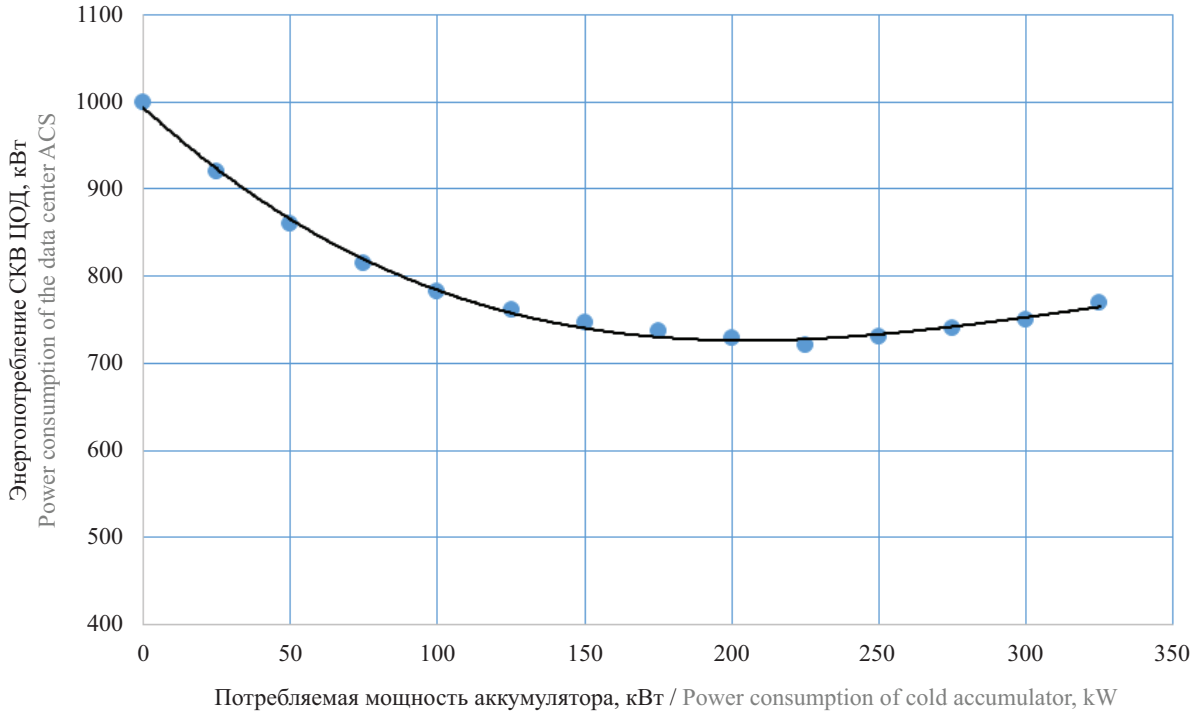


Рис. 7. Снижение энергопотребления системы охлаждения на базе СКВ ЦОД при использовании аккумулятора холода

Fig. 7. Reducing energy consumption of cooling systems based on ACS data centres when using cold accumulator

Полученные данные показывают эффективность предложенного решения. Так, применение аккумулятора холода в высокопроизводительных системах позволяет снизить энергозатраты на оборудование в среднем на 20–30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемы технологии

К проблемам технологии, в первую очередь, следует отнести сложность расчета процесса динамики многофазного потока. В работе [28] исследовались процессы гидродинамики двухфазного кипящего потока, показывающие возрастание сопротивления при увеличении массовой скорости и высоты канала.

Основной проблемой является опасность попадания паров воды и соли в компрессор-нагнетатель после кристаллизатора. Проблема до конца не решена, однако первичные эксперименты демонстрируют возможность устранения паров воды и соли с помощью отделителя жидкости.

Использованный фреон RC318c [29, 30] имеет теплофизические параметры, наиболее подходящие для данного способа льдообразования по сравнению с фреонами R410a, R406a или R134a, и не образует кристаллогидратов, что позволяет упростить расчет и технологию аккумулирования.

Выводы и перспективы

Полученные в ходе исследований данные демонстрируют, что применение нового вида аккумулирования имеет свои преимущества и дает возможность значительно повысить энергоэффективность холодильных машин и установок СКВ, в среднем на 20–30 % снизить энергозатраты по сравнению с имеющимися технологиями.

Расчетная методика показывает, что применение установок аккумулирования холода с непосредственным контактом сред дает свои существенные экономические и энергетические преимущества. Особенно такая система важна для помещений серверных и ЦОД.

Установка аккумулирования комбинируется с холодильной машиной СКВ и выравнивает нагрузку на систему по полупиковым значениям потребления, что имеет значимые плюсы, а именно уменьшение первичных капитальных затрат.

Подводя итог, можно дать оценку, что аккумулирование по предложенному способу имеет высокую энергоэффективность и перспективно с экономической точки зрения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кузнецов П.А.* Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха на основе аккумулирования низкотемпературной энергии : дис. … канд. техн. наук. СПб., 2021. 221 с. EDN LMWSGW.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

2. *Fathoni A.M., Putra N., Mahlia T.M.I.* A systematic review of battery thermal management systems based on heat pipes // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 73. P. 109081. DOI: 10.1016/j.est.2023.109081

3. *Tashtoush B., Qaseem H.* An integrated absorption cooling technology with thermoelectric generator powered by solar energy // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147. Issue 2. Pp. 1547–1559. DOI: 10.1007/s10973-020-10512-5

4. *Парфенов С.Г., Азаркина С.М.* Развитие энергоэффективного строительства в Брянской области // Инновации в строительстве – 2022 : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 93–95. EDN THTUOM.

5. *Окуренков А.О., Морозенко Г.К., Филиппов И.А., Малай А.В.* Современные тенденции в проектировании систем теплогазоснабжения и вентиляции // Перспективы науки. 2020. № 3 (126). С. 44–46. EDN YIWPLO.

6. *Ding Z., Wu W., Leung M.* Advanced/hybrid thermal energy storage technology: material, cycle, system and perspective // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 145. P. 111088. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111088

7. *Purandare A.S., van Lohuizen S.W., Spijkers R.M.A., Vanapalli S.* Experimental and numerical study of insulation packages containing dry ice pellets // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 186. P. 116486. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116486

8. *He T., Lv H., Shao Z., Zhang J., Xing X., Ma H.* Cascade utilization of LNG cold energy by integrating cryogenic energy storage, organic Rankine cycle and direct cooling // Applied Energy. 2020. Vol. 277. P. 115570. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115570

9. *Саитбаталов М.В.* Теплогидравлическая эффективность процессов охлаждения газов и жидкостей при непосредственном контакте фаз в пленочном режиме теплообменных установок : дис. … канд. техн. наук. Казань, 2014. 270 с.

10. *Плотников В.Т.* Разделительные вымораживающие установки. М. : Агропромиздат, 1987. 352 с.

11. *Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Мордынский В.П., Сиротюк И.В., Фатеева Я.А.* Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта «термического парадокса» // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 1 (53). С. 42–58. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.04. EDN UJEPQL.

12. *Попель О.С., Фрид С.Е., Тарасенко А.Б., Чернявский А.А.* Анализ эффективности практического использования систем сезонного аккумулирования природного холода // Вестник Дагестанского научного центра РАН. 2013. № 49. С. 19–26. EDN RVKCQD.

13. *Синицын В.И., Шуршакова Е.В.* Современные тенденции в проектировании систем теплогазоснабжения и вентиляции // Экология и строительство. 2015. № 4. С. 15–17. EDN VJSOWZ.

14. *Stritih U., Butala V.* RETRACTED: Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage // International Journal of Refrigeration. 2010. Vol. 33. Issue 8. Pp. 1676–1683. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.07.017

15. *Souayfane F., Fardoun F., Biwole P.H.* Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings : a review // Energy and Buildings. 2016. Vol. 129. Pp. 396–431. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.006

16. *Jouhara H., Żabnieńska-Góra A., Khordehgah N., Ahmad D., Lipinski T.* Latent thermal energy storage technologies and applications : a review // International Journal of Thermofluids. 2020. Vol. 5–6. P. 100039. DOI: 10.1016/j.ijft.2020.100039

17. *Vakiloroaya V., Samali B., Fakhar A., Pishghadam K.* A review of different strategies for HVAC energy saving // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 77. Pp. 738–754. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.10.023

18. *Cui B., Gao D., Wang S., Xue X.* Effectiveness and life-cycle cost-benefit analysis of active cold storages for building demand management for smart grid applications // Applied Energy. 2015. Vol. 147. Pp. 523–535. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.041

19. *Rahgozar S., Dehghan M., Pourrajabian A., Haghgou H.* Economic feasibility of ice storage systems for office building applications : a climate sensitivity analysis // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 45. P. 103712. DOI: 10.1016/j.est.2021.103712

20. *Shaibani A.R., Keshtkar M.M., Sardari P.T.* Thermo-economic analysis of a cold storage system in full and partial modes with two different scenarios : a case study // Journal of Energy Storage. 2019. Vol. 24. P. 100783. DOI: 10.1016/j.est.2019.100783

21. *Gao E., Zhang Z., Deng Q., Jing H., Wang X., Zhang X.* Techno-economic and environmental analysis of low-GWP alternative refrigerants in cold storage unit under year-round working conditions // International Journal of Refrigeration. 2022. Vol. 134. Pp. 197–206. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.007

22. *Piette M.A.* Analysis of a commercial ice-storage system: Design principles and measured performance // Energy and Buildings. 1990. Vol. 14. Issue 4. Pp. 337–350. DOI: 10.1016/0378-7788(90)90096-2

23. *Song X., Liu L., Zhu T., Chen S., Cao Z.* Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 133. Pp. 613–621. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.063

24. *Birkea F.M.O., Almarashi A., AL-bonsrulah H.A.Z., Saif Aldien M., Makkawi A.H., Mohamed S.M.Y.* Improvement of cold storage efficiency with loading hybrid nanoparticles and utilizing porous media // Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 61. P. 104885. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104885

25. *Ismail M., Zahra W.K., Ookawara S., Hassan H.* Enhancing the air conditioning unit performance

via energy storage of different inorganic phase change materials with hybrid nanoparticles // JOM. 2023. Vol. 75. Issue 3. Pp. 739–753. DOI: 10.1007/s11837-022-05629-x

26. Патент RU № 2766952 C1, МПК F25D 3/00. Способ аккумулирования холода и устройство для его осуществления / *Семенов А.Е., Андреев А.И.*; заявитель Астраханский государственный технический университет; заявл. № 2021124868 от 23.08.2021; опубл. 16.03.2022.

27. Патент RU № 2808128 C1, МПК F25D 3/00. Способ аккумулирования холода / *Семенов А.Е., Андреев А.И.*; заявитель Астраханский государственный технический университет; заявл. № 2022133884 от 22.12.2022; опубл. 23.11.2023.

28. *Букин В.Г., Андреев А.И., Букин А.В.* Гидравлическое сопротивление при кипении хладагентов в трубах горизонтальных и вертикальных испарителей судовых холодильных машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 92–99. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-92-99. EDN IQLSKR.

29. *Bell I.H., Ziviani D., Lemort V., Bradshaw C.R., Mathison M., Horton W.T. et al.* PDSim: A general quasi-steady modeling approach for positive displacement compressors and expanders // International Journal of Refrigeration. 2020. Vol. 110. Pp. 310–322. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.09.002

30. *Zhang Y., Su L., Dong K., Liu T.* Experimental study of ice slurry production system using direct contact heat transfer of RC318 and water in a horizontal pipe // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. Pp. 4495–4501. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.762

Поступила в редакцию 2 февраля 2025 г.
Принята в доработанном виде 9 августа 2025 г.
Одобрена для публикации 15 сентября 2025 г.

Об авторах: **Александр Иванович Андреев** — ассистент, аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; **Астраханский государственный технический университет (АГТУ)**; 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16; SPIN-код: 8353-2570, ORCID: 0000-0003-4064-9835; aresut79@mail.ru;

Александр Евгеньевич Семенов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; **Астраханский государственный технический университет (АГТУ)**; 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16; SPIN-код: 6482-8182, РИНЦ ID: 4777446, ResearcherID: 301703507884, ORCID: 0000-0002-2513-9389; semenalex48@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuznetsov P.A. *Improving the efficiency of air conditioning systems based on low-temperature energy accumulation : dis. ... candidate of technical sciences.* St. Petersburg, 2021; 221. EDN LMWSGW. (rus.).

2. Fathoni A.M., Putra N., Mahlia T.M.I. A systematic review of battery thermal management systems based on heat pipes. *Journal of Energy Storage.* 2023; 73:109081. DOI: 10.1016/j.est.2023.109081

3. Tashtoush B., Qaseem H. An integrated absorption cooling technology with thermoelectric generator powered by solar energy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2022; 147(2):1547-1559. DOI: 10.1007/s10973-020-10512-5

4. Parfenov S.G., Azarkina S.M. Development of energy-efficient construction in the Bryansk region. *Innovations in construction – 2022 : materials of the international scientific and practical conference.* 2022; 93-95. EDN THTUOM. (rus.).

5. Okurenkov A.O., Morozenko G.K., Filippov I.A., Malay A.V. Modern trends in the design of systems of heat and ventilation. *Science Prospects.* 2020; 3(126):44-46. EDN YIWPLO. (rus.).

6. Ding Z., Wu W., Leung M. Advanced/hybrid thermal energy storage technology: material, cycle, system and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2021; 145:111088. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111088

7. Purandare A.S., van Lohuizen S.W., Spijkers R.M.A., Vanapalli S. Experimental and numerical study of insulation packages containing dry ice pellets. *Applied Thermal Engineering.* 2021; 186:116486. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116486

8. He T., Lv H., Shao Z., Zhang J., Xing X., Ma H. Cascade utilization of LNG cold energy by integrating cryogenic energy storage, organic Rankine cycle and direct cooling. *Applied Energy.* 2020; 277:115570. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115570

9. Saitbatalov M.V. *Thermal-hydraulic efficiency of gas and liquid cooling processes with direct phase contact in the film mode of heat exchange units : dis. ... candidate of technical sciences.* Kazan, 2014; 270. (rus.).

10. Plotnikov V.T. *Separation freezing installations.* Moscow, Agropromizdat, 1987; 352. (rus.).

11. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotyuk I.V., Fateeva Ya.A. Multifunctional equip-

ment for low-temperature separation of food solutions based on the effect of “thermal paradox”. *Problems of the Regional Energetics.* 2022; 1(53):42-58. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.04. EDN UJEPQL. (rus.).

12. Popel O.S., Frid S.E., Tarasenko A.B., Chernyavsky A.A. Effectiveness of natural cold seasonal storage practical use. *Herald of the Dagestan Scientific Center.* 2013; 49:19-26. EDN RVKCQD. (rus.).

13. Sinitcyn V.I., Shurshakova E.V. The modern trends in the design of systems of heat and ventilation. *Ekologiya i Stroitelstvo.* 2015; 4:15-17. EDN VJSOWZ. (rus.).

14. Stritih U., Butala V. RETRACTED: Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage. *International Journal of Refrigeration.* 2010; 33(8):1676-1683. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.07.017

15. Souayfane F., Fardoun F., Biwole P.H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings : a review. *Energy and Buildings.* 2016; 129:396-431. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.006

16. Jouhara H., Żabnieńska-Góra A., Khordehgah N., Ahmad D., Lipinski T. Latent thermal energy storage technologies and applications : a review. *International Journal of Thermofluids.* 2020; 5-6:100039. DOI: 10.1016/j.ijft.2020.100039

17. Vakiloroaya V., Samali B., Fakhar A., Pishghadam K. A review of different strategies for HVAC energy saving. *Energy Conversion and Management.* 2014; 77:738-754. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.10.023

18. Cui B., Gao D., Wang S., Xue X. Effectiveness and life-cycle cost-benefit analysis of active cold storages for building demand management for smart grid applications. *Applied Energy.* 2015; 147:523-535. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.041

19. Rahgozar S., Dehghan M., Pourrajabian A., Haghgou H. Economic feasibility of ice storage systems for office building applications: A climate sensitivity analysis. *Journal of Energy Storage.* 2022; 45:103712. DOI: 10.1016/j.est.2021.103712

20. Shaibani A.R., Keshtkar M.M., Sardari P.T. Thermo-economic analysis of a cold storage system in full and partial modes with two different scenarios: a case study. *Journal of Energy Storage.* 2019; 24:100783. DOI: 10.1016/j.est.2019.100783

21. Gao E., Zhang Z., Deng Q., Jing H., Wang X., Zhang X. Techno-economic and environmental analysis of low-GWP alternative refrigerants in cold storage unit under year-round working conditions. *International Journal of Refrigeration.* 2022; 134:197-206. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.007

22. Piette M.A. Analysis of a commercial ice-storage system: Design principles and measured performance. *Energy and Buildings.* 1990; 14(4):337-350. DOI: 10.1016/0378-7788(90)90096-2

23. Song X., Liu L., Zhu T., Chen S., Cao Z. Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage. *Applied Thermal Engineering.* 2018; 133:613-621. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.063

24. Birkea F.M.O., Almarashi A., AL-bonsrulah H.A.Z., Saif Aldien M., Makkawi A.H., Mohamed S.M.Y. Improvement of cold storage efficiency with loading hybrid nanoparticles and utilizing porous media. *Case Studies in Thermal Engineering.* 2024; 61:104885. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104885

25. Ismail M., Zahra W.K., Ookawara S., Hassan H. Enhancing the air conditioning unit performance via energy storage of different inorganic phase change materials with hybrid nanoparticles. *JOM.* 2023; 75(3):739-753. DOI: 10.1007/s11837-022-05629-x

26. Patent RU No. 2766952 C1, IPC F25D 3/00. *Method of cold accumulation and device for its implementation* / Semenov A.E., Andreev A.I.; applicant Astrakhan State Technical University; applied No. 2021124868 08/23/2021; publ. 03/16/2022. (rus.).

27. Patent RU No. 2808128 C1, IPC F25D 3/00. *Method of cold accumulation* / Semenov A.E., Andreev A.I.; applicant Astrakhan State Technical University; applied No. 2022133884 12/22/2022; publ. 23.11.2023. (rus.).

28. Bukin V.G., Andreev A.I., Bukin A.V. Hydraulic resistance of pipes under refrigerant boiling in horizontal and vertical evaporators in ship refrigerating machines. Vestnik of Astrakhan State Technical University. *Series: Marine Engineering and Technologies.* 2020; 2:92-99. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-92-99. EDN IQLSKR. (rus.).

29. Bell I.H., Ziviani D., Lemort V., Bradshaw C.R., Mathison M., Horton W.T. et al. PDSim: A general quasi-steady modeling approach for positive displacement compressors and expanders. *International Journal of Refrigeration.* 2020; 110:310-322. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.09.002

30. Zhang Y., Su L., Dong K., Liu T. Experimental study of ice slurry production system using direct contact heat transfer of RC318 and water in a horizontal pipe. *Energy Procedia.* 2019; 158:4495-4501. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.762

Received February 2, 2025.
Adopted in revised form on August 9, 2025.
Approved for publication on September 15, 2025.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

BIONOTES: **Aleksander I. Andreev** — assistant, postgraduate student of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; **Astrakhan State Technical University**; 16 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation; SPIN-code: 8353-2570, ORCID: 0000-0003-4064-9835; aresut79@mail.ru;

Alexander E. Semenov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; **Astrakhan State Technical University**; 16 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation; SPIN-code: 6482-8182, ID RSCI: 4777446, ResearcherID: 301703507884, ORCID: 0000-0002-2513-9389; semenalex48@yandex.ru.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 697.1
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1744-1766

Экспериментальные исследования обоснованности температуры наиболее холодной пятидневки на территории Белгородской области

Евгений Олегович Шеремет, Валерий Анатольевич Уваров, Николай Юрьевич Никулин, Алена Анатольевна Шеремет, Никита Юрьевич Саввин

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мотивацией для настоящего исследования послужило изменение расчетной температуры наиболее холодной пятидневки Белгородской области по последним справочным данным, идущим вразрез с глобальным трендом потепления климата. Выдвинута гипотеза о возможной необоснованности полученных справочных сведений, проведены экспериментальная проверка и анализ полученных результатов. Представлена информация об изменении климатических параметров отопительного сезона Белгородской области. Выявлены недостатки в существующей методике расчета обеспеченности наиболее холодных пятидневок и предложены способы решения указанной проблемы.

Материалы и методы. С целью расчета основных климатических параметров холодного периода года использовались архивы данных действующих метеорологических станций. Применялась библиотека для обработки информации и анализа данных Pandas; в качестве визуализации использовалась библиотека Matplotlib; для решения представленных в работе математических задач — библиотека SciPy.

Результаты. Представлены подробные результаты исследования изменения климатических параметров Белгородской области. Показаны описательные статистики по каждой из метеостанций, обладающих достаточной глубиной архива данных для исследований. Приведены изменения среднегодовых температур метеостанций в течение всего периода исследований. Рассчитаны и визуализированы изменения основных расчетных параметров отопительных периодов. Выполнены расчеты, позволяющие установить температуры наиболее холодной пятидневки на каждой метеостанции в различных комбинациях.

Выводы. Выявлено, что климатические изменения в Белгородской области по сведениям всех метеостанций региона соответствуют глобальным изменениям климата. Указанная в последней редакции строительной климатологии температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 является избыточной и не достигает ни при каком из обоснованных сочетаний –24 °С. Полученные температуры наиболее холодных пятидневок метеостанций меньше установленного значения на 1–2 °С. Предложено использовать для расчета наиболее холодных пятидневок несколько региональных метеостанций. Эти предложения будут способствовать обоснованному снижению стоимости систем отопления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, климатические параметры, распределение экстремальных значений, холодный период года, наиболее холодная пятидневка, система отопления

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Шеремет Е.О., Уваров В.А., Никулин Н.Ю., Шеремет А.А., Саввин Н.Ю.* Экспериментальные исследования обоснованности температуры наиболее холодной пятидневки на территории Белгородской области // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1744–1766. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1744-1766

Автор, ответственный за переписку: Алена Анатольевна Шеремет, aleenisokay@ya.ru.

Experimental studies on the validity of the coldest five-day period temperature in the Belgorod Region

Evgeniy O. Sheremet, Valeriy A. Uvarov, Nikolaj Yu. Nikulin, Alena A. Sheremet, Nikita Yu. Savvin

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov); Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The motivation for this study was the change in the calculated temperature of the coldest five-day period in the Belgorod Region according to the latest reference data, which runs counter to the global trend of climate warming. A hy-

© Е.О. Шеремет, В.А. Уваров, Н.Ю. Никулин, А.А. Шеремет, Н.Ю. Саввин, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

pothesis was put forward about the possible groundlessness of the obtained reference data and an experimental verification and analysis of the obtained results were carried out. Data on the change in climatic parameters of the heating season in the Belgorod region are presented. Shortcomings in the existing methodology for calculating the provision of the coldest five-day periods were identified and ways to solve this problem were proposed.
Materials and methods. To calculate the main climate parameters of the cold period of the year, archives of data from existing meteorological stations were used. The Pandas library for data processing and analysis was used to process the data; the Matplotlib library was used for data visualization; the SciPy library was used to solve the mathematical problems presented in the work.
Results. The detailed results of the study of changes in the climatic parameters of the Belgorod region are presented. Detailed descriptive statistics are shown for each of the meteorological stations with a sufficient depth of data archive for research. The change in average annual temperatures of meteorological stations during the entire period of research is presented. Changes in the main calculated parameters of heating periods are calculated and visualized. Calculations are made to establish the temperatures of the coldest five-day period at each meteorological station in various combinations.
Conclusions. It was revealed that climate changes in the Belgorod region, according to data from all meteorological stations in the region, correspond to global climate changes. The temperature of the coldest five-day period with a provision of 0.92 specified in the latest edition of construction climatology is excessive and does not reach –24 °C under any of the justified combinations. The obtained temperatures of the coldest five-day periods of meteorological stations are lower than the established value by 1–2 °C. It is proposed to use several regional meteorological stations to calculate the coldest five-day periods. These proposals will contribute to a justified reduction in the cost of heating systems.

KEYWORDS: climate change, climate parameters, distribution of extreme values, cold period of the year, coldest five-day period, heating system

Acknowledgments. This work was realized in the framework of the Program “Priority 2030” on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. This work was realized using equipment of High Technology Centre at BSTU after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Sheremet E.O., Uvarov V.A., Nikulin N.Yu., Sheremet A.A., Savvin N.Yu. Experimental studies on the validity of the coldest five-day period temperature in the Belgorod Region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1744-1766. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1744-1766 (rus.).

Corresponding author: Alena A. Sheremet, aleenisokay@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных научных работах, основанных на многолетних наблюдениях и обширных исследованиях, подтверждается наличие глобального потепления и изучаются вопросы его возможного влияния и прогнозирования в среднесрочных и долгосрочных масштабах. Приводятся данные о том, что даже при сокращении выбросов рост глобальной температуры продолжится [1]. Это заставляет ученых разрабатывать и анализировать технологии на предмет минимального влияния на ускорение глобального потепления [2]. Некоторые авторы [3] делают акцент на том, что потепление продолжится, но не будет таким критичным, как утверждают в самых пессимистичных сценариях. Есть большая вероятность более умеренных сценариев, которые не приведут к фатальным последствиям. В то же время в исследовании [4] выявили, что происходит увеличение содержания водяного пара в тропосфере, что усиливает процессы глобального потепления. Возможное влияние глобального потепления и человека на вероятные прогнозируемые засухи в регионах Азии и Ближнего Востока рассматривается в труде [5]. Определяются региональные особенности климатических рисков в Китае при различных сценариях глобального потепления [6]. Предоставляются дополнительные доказательства существенного изменения климата в течение следующих десятилетий [7]. Анализируются изменения климатических условий в Восточной Азии и указывается на чувствительность региона к глобальным изменениям [8]. В публикациях [9, 10] также подтверждается наличие глобального потепления на базе изучения эквивалентной потенциальной температуры поверхности и исследований современных температурных рядов.

Таким образом, совокупность информации, полученной из различных областей климатологии, свидетельствует о комплексном характере глобального потепления. Этот феномен проявляется в устойчивых изменениях температурных режимов земной поверхности, что подтверждается систематическим анализом климатических показателей в долгосрочной перспективе. Ключевой причиной глобального потепления выступает увеличение атмосферной концентрации углекислого газа, вызванное человеческой деятельностью — промышленностью, транспортом, добывающим сектором, сведением лесов и энергетическими затратами зданий.

Современные климатические модели, основанные на физико-математических расчетах, прогнозируют дальнейшую динамику глобального потепления в зависимости от различных сценариев антропогенного воздействия. Согласно наиболее благоприятным прогнозам, средняя температура на планете будет продолжать умеренно расти как минимум до середины XXI в., после чего возможна стабилизация или небольшое снижение температурных показателей. Однако более вероятные сценарии, учитывающие текущие тенденции выбросов парниковых газов, указывают на значительное повышение глобальной температуры от 2 до 5 °C к концу

столетия (2085–2100 гг.) относительно базового периода 1986–2005 гг.

Современная энергетическая стратегия Российской Федерации[1, 2, 3, 4] включает комплекс мер, направленных на оптимизацию энергопотребления и повышение эффективности использования энергоресурсов в масштабах всего топливно-энергетического сектора. В рамках этой политики особое внимание уделяется сокращению энергоемкости производственных процессов, что требует внедрения интеллектуальных систем мониторинга и управления [11]. Одновременно ведется модернизация систем теплоснабжения, которая включает как совершенствование методов диагностики их текущего состояния [12], так и внедрение цифровых моделей для увеличения надежности проектных решений [13]. Повышение адаптивности и эксплуатационных характеристик достигается за счет использования современных информационно-диагностических систем контроля оборудования [14] и внедрения перспективных адаптивных стратегий управления, ориентированных на оптимизацию гидравлических и температурных режимов [15]. При этом разработка и реализация энергосберегающих инициатив в российских условиях требуют обязательного учета климатических изменений как на глобальном уровне, так и с учетом региональных особенностей каждого субъекта РФ.

Изучаются климатические изменения в глобальном масштабе и в пределах Российской Федерации [16–21]. Тем не менее недостаточное внимание уделяется анализу трансформации ключевых характеристик отопительного периода, имеющих принципиальное значение для проектирования новых зданий и их теплосистем и оценки потенциала энергосбережения существующих сооружений. Большинство доступных исследований [16] носят обобщающий характер, рассматривая влияние глобального потепления на инфраструктурные системы в целом. Лишь ограниченное число зарубежных работ фокусируется на рассмотрении взаимосвязи между климатическими изменениями и энергоэффективностью зданий. При этом имеющиеся публикации в основном посвящены региональному анализу: систематизировано влияние климатических изменений на энергопотребление зданий для отопления и охлаждения [17], на примере Китая и Португалии анализируются прогнозы изменения градусодней отопления и охлаждения [18, 19]. Аналогичные расчеты для Канады и Сербии [20, 21] также подтверждают общую тенденцию к изменению баланса между энергией на отопление и охлаждение.

В некоторых отечественных работах предметом изучения являлись расчетные характеристики холодного периода года [22–24]. Приведена методика вычисления расчетных температур в холодный период года с варьируемой обеспеченностью [22]. При расчете требуемого сопротивления теплопередаче окон предлагается учитывать расчетную температуру наружного воздуха для холодного периода года [23]. Исследование [24] содержит комплексный анализ изменения климатических параметров Санкт-Петербурга, в том числе холодного периода года, и устанавливает, что фактические тепловые нагрузки оказываются значительно ниже расчетных, а фактическая расчетная температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 выше нормативного значения на 3 °С.

Проведен детальный анализ влияния глобального потепления на отопительный период в европейской части России [25]. На основе данных 90 метеостанций за 1881–1995 гг. были рассчитаны продолжительность отопительного сезона, средняя температура и дефицит тепла. Данные обработаны с применением 10-летнего скользящего среднего и регрессионно-аналитической модели климата [26–28]. Результаты визуализированы в виде карт с изолиниями текущих и прогнозируемых (до 2050 г.) параметров.

Проанализированы климатические трансформации в Белгородской области на данных метеостанции Готня [29]. Результаты продемонстрировали устойчивую тенденцию к потеплению климата в регионе, согласующуюся с глобальными процессами. На основании анализа тенденций роста среднегодовых температур определены ключевые климатические показатели: изменение среднегодовых температурных значений, длительности отопительных сезонов, температурных характеристик отопительного периода и градусо-суток отопительного периода. Результаты исследований показали, что темпы потепления на большей части территории Белгородской области в 2 раза превышают прогнозные оценки, сделанные в начале 2000-х гг.

Выполненный анализ нормативной документации выявил ряд противоречий в климатических параметрах, не соответствующих современным тенденциям изменения регионального климата. В частности, в СНиП 2.01.01–82 и СНиП 23-01–99 установлена идентичная расчетная температура –23 °С для наиболее холодной пятидневки с обеспеченно-

[1] Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (в ред. от 11.06.2021).

[2] О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203. URL: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/

[3] Методология расчета индекса «Цифровая Россия» субъектов Российской Федерации // Московская школа управления Сколково.

[4] Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. URL: http://base.garant.ru/71734878/

стью 0,92. При этом в актуализированной версии СП 131.13330.2020 для аналогичных условий указана более низкая температура –24 °С. Подобная корректировка нормативных значений представляется методически необоснованной, особенно на фоне зафиксированных климатических изменений, свидетельствующих о тенденции к потеплению.

Для верификации адекватности указанных нормативных температурных значений был проведен комплексный анализ метеорологических данных всех метеостанций региона. Исследование включало детальную оценку фактических температурных показателей, анализ ключевых характеристик отопительного сезона, вычисление и анализ обеспеченностей наиболее холодных пятидневок, сравнительный анализ полученных данных с нормативными значениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для детального изучения изменений основных параметров отопительного сезона в Белгородской области проанализированы температуры шести метеостанций. Так как основные расчетные параметры отопительного периода, в том числе наиболее холодные пятидневки, в последней редакции строительной климатологии рассчитаны за 1998–2018 гг., изначально анализировались архивы температур с достаточной глубиной сведений. На территории Белгородской области только 3 из 6 метеостанций имеют достаточную глубину архивных данных. Метеостанции, расположенные на территории или вблизи населенных пунктов Пролетарского (ж/д станция Готня), Валуек и Богородицкого.

На первом этапе рассматривался вопрос статистического отличия среднедневных температур в приведенных выше населенных пунктах. Были посчитаны описательные статистики для каждой из метеостанций, проанализирована динамика изменения среднегодовых температур приведенных метеостанций. Далее сравнивались продолжительности отопительных периодов, температуры наиболее холодных дней, температуры наиболее холодных пятидневок, средние температуры отопительных периодов, а также градусо-сутки отопительных периодов. Затем обрабатывались наиболее холодные пятидневки, рассчитывалась обеспеченность по методике, приведенной в последней редакции строительной климатологии для каждой из метеостанции и в различных комбинациях.

Для анализа сведений применялись Python-библиотеки: Pandas (обработка данных), Matplotlib (визуализация) и SciPy (научные вычисления). Тренды выделялись с помощью 10-периодной скользящей средней для сглаживания краткосрочных колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ температурных данных метеостанций Готни, Валуйки и Богородицкого включал расчет основных статистических показателей среднесуточных температур (табл. 1). При обработке температур не учитывались годы с большими пропусками данных. Таким образом, в выборке отсутствует информация в промежутке с 1941 по 1944 г. включительно.

Исходя из анализа средних значений можно сделать вывод, что в среднем наиболее «холодной»

Табл. 1. Статистические характеристики временного ряда среднесуточных температур по данным метеостанций Готни, Богородицкого и Валуек с 1939 по 2023 г.

Table 1. Statistical characteristics of the time series of average daily temperatures according to the weather stations Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki from 1939 to 2023

Статистические характеристики Statistical characteristics	Готня Gotnya	Валуйки Valuyki	Богородицкое Bogoroditskoe
Объем выборки, ед. Specimen size, units	26 662	26 662	26 662
Среднее значение, °С Average value, °С	6,76	7,59	6,37
Стандартное отклонение, °С Standard deviation, °С	10,86	11,02	11,05
Абсолютный минимум, °С Absolute minimum, °С	–32,4	–32,0	–31,8
Первый квартиль, °С First quartile, °С	–1,1	–0,4	–1,5
Второй квартиль, °С Second quartile, °С	7,2	8,1	6,8
Третий квартиль, °С Third quartile, °С	16,2	17,1	16,0
Абсолютный максимум, °С Absolute maximum, °С	30,0	32,0	29,4

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

метеостанцией Белгородской области является метеостанция Богородицкого, наиболее «теплой» — метеостанция Валуек. Несмотря на то, что температура первого квартиля ниже у метеостанции Богородицкого, минимальное значение температур наблюдается у метеостанции Готни. Это говорит о том, что температуры наиболее холодных дней и наиболее холодных пятидневок могут наблюдаться и у метеостанции с более высокими квантильными показателями температур.

Ниже представлена временная динамика среднегодовых температур для метеостанций Готни, Богородицкого и Валуек (рис. 1). График отражает минимальные, средние и максимальные температурные значения, а также 10-летние скользящие средние, позволяющие выявить долгосрочные тенденции. Анализ информации свидетельствует об устойчивом росте температурных показателей на всех станциях, начиная с периода 1985–1990 г., что хорошо согласуется с глобальными данными по выбросам и потеплением планеты в целом. Судя по данным, метеостанцией с наиболее высокими среднегодовыми минимальными, средними и максимальными температурами является метеостанция Валуек, а с самыми низкими — Богородицкого. Среднегодовые средние температуры Валуек до 1985 г. колеблются в районе 7 °C и достигают 9 °C к 2020 г. Среднегодовые средние температуры Богородицкого до 1990 г. почти никогда не превышали 6 °C, но к 2020 г. достигают почти 8 °C. Таким обра-

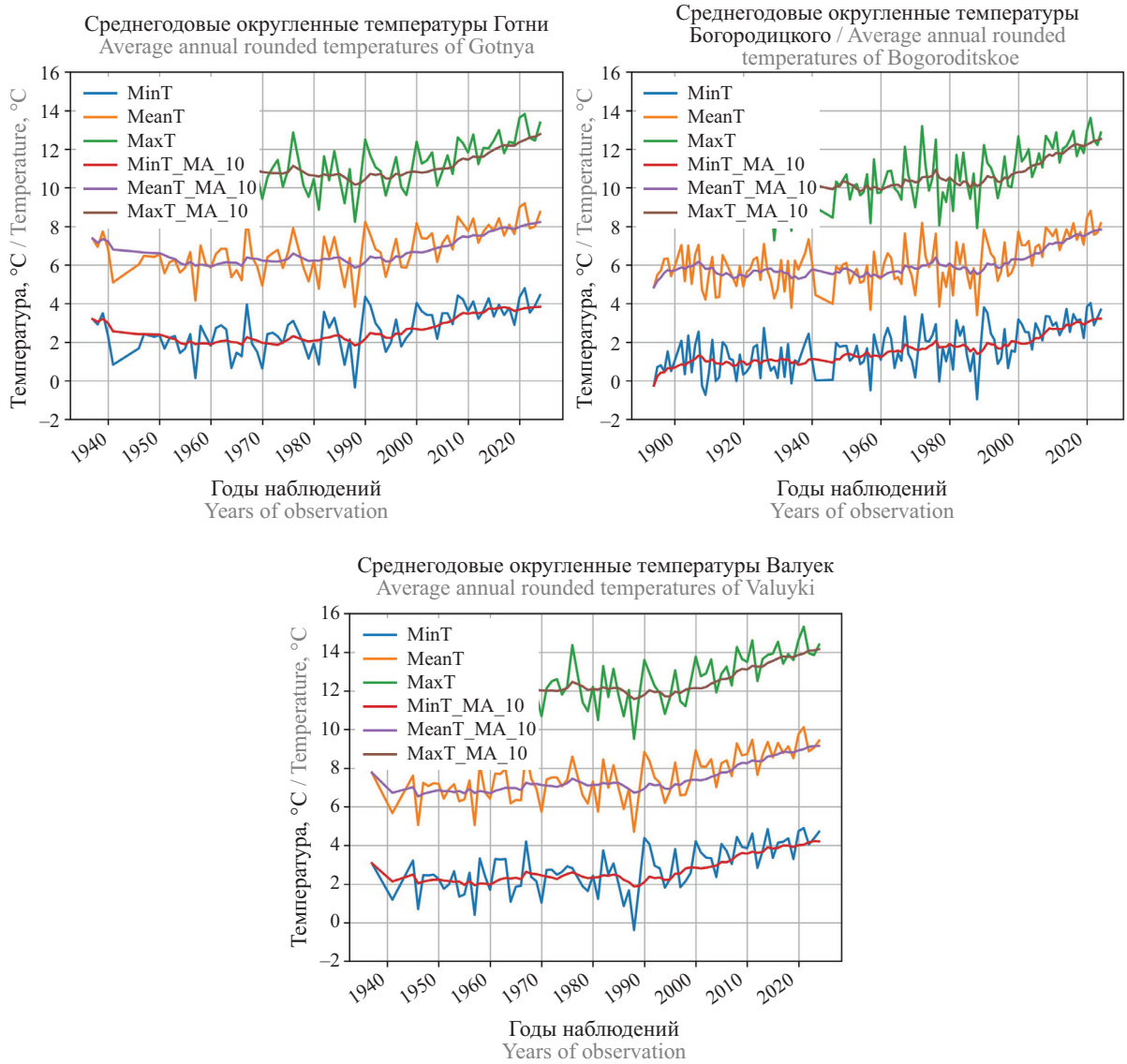


Рис. 1. Временная изменчивость среднегодовых температур Готни, Богородицкого и Валуек: MinT, MaxT, MeanT — экстремальные и средние температурные показатели; MinT_MA_10, MaxT_MA_10, MeanT_MA_10 — сглаженные 10-летней скользящей средней минимальные, максимальные и средние значения

Fig. 1. Temporal variability of average annual temperatures in Gotnya, Bogoroditskoye and Valuyki: MinT, MaxT, MeanT extreme and average temperature values; MinT_MA_10, MaxT_MA_10, MeanT_MA_10 — minimum, maximum and average values smoothed by a 10-year moving average

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

зом, разница средних среднегодовых температур для указанных периодов составляет около 1 °C.

В табл. 2 представлены описательные статистики распределения исторических среднегодовых температур метеостанции Готни, разделенные на два периода: до и после 1988 г. (включая аномальные понижения 1987–1988 гг.), а также разница между соответствующими статистиками. Анализ данных показывает устойчивую тенденцию к повышению температур в более позднем периоде, что подтверждается ростом всех ключевых показателей: минимальных, средних и максимальных значений.

В табл. 3 приведены описательные статистики распределения исторических среднегодовых температур метеостанции Богородицкого, разделенные на периоды до и после 1988 г. Анализ информации выявляет значительное повышение температурных показателей во всех категориях (минимальные, средние, максимальные), что подтверждает устойчивую тенденцию к потеплению.

В табл. 4 представлены описательные статистики распределения исторических среднегодовых температур метеостанции Валуек, разделенные на периоды до и после 1988 г. Сведения отражают устойчивый рост температурных показателей, характерный для всех категорий (минимальные, средние, максимальные), что подтверждает климатический сдвиг в сторону потепления.

Табл. 2. Описательные статистики распределения данных исторических среднегодовых температур метеостанции Готни

Table 2. Descriptive statistics of the distribution of historical mean annual temperature data from the Gotnya weather station

Статистические характеристики Statistical characteristics	Значения до 1988 г. Values before 1988			Значения после 1988 г. Values after 1988			Разница в статистике Difference in statistics		
	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
Среднее значение, °C Average value, °C	2,07	6,20	10,63	3,38	7,47	11,71	1,30	1,27	1,08
Стандартное отклонение, °C Standard deviation, °C	0,91	0,93	1,03	0,83	0,93	1,08	–0,08	0,00	0,05
Абсолютный минимум, °C Absolute minimum, °C	–0,35	3,83	8,24	1,50	5,38	9,60	1,84	1,55	1,36
Первый квартиль, °C First quartile, °C	1,58	5,79	10,13	2,92	6,82	10,86	1,34	1,03	0,73
Второй квартиль, °C Second quartile, °C	2,22	6,25	10,54	3,50	7,59	11,81	1,28	1,33	1,27
Третий квартиль, °C Third quartile, °C	2,70	6,72	11,29	3,97	8,10	12,45	1,27	1,37	1,16
Абсолютный максимум, °C Absolute maximum, °C	3,95	8,43	13,29	4,79	9,19	13,82	0,85	0,76	0,53

Табл. 3. Описательные статистики распределения данных исторических среднегодовых температур метеостанции Богородицкого

Table 3. Descriptive statistics of the distribution of historical average annual temperature data from the Bogoroditskoe weather station

Статистические характеристики Statistical characteristics	Статистические характеристики Statistical characteristics			Значения до 1988 г. Values before 1988			Значения после 1988 г. Values after 1988		
	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
Среднее значение, °C Average value, °C	1,25	5,68	10,01	2,67	7,10	11,69	1,42	1,42	1,68
Стандартное отклонение, °C Standard deviation, °C	0,96	0,95	1,09	0,86	0,89	0,98	–0,11	–0,06	–0,11
Абсолютный минимум, °C Absolute minimum, °C	–0,96	3,40	7,28	0,65	5,17	9,46	1,61	1,77	2,18
Первый квартиль, °C First quartile, °C	0,49	5,03	9,38	2,19	6,54	11,05	1,70	1,51	1,67
Второй квартиль, °C Second quartile, °C	1,15	5,74	10,07	2,79	7,23	11,79	1,64	1,49	1,72
Третий квартиль, °C Third quartile, °C	1,89	6,28	10,70	3,29	7,73	12,42	1,40	1,45	1,72
Абсолютный максимум, °C Absolute maximum, °C	3,43	8,18	13,19	4,03	8,81	13,62	0,59	0,63	0,43

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Табл. 4. Описательные статистики распределения данных исторических среднегодовых температур метеостанции Валуек

Table 4. Descriptive statistics of the distribution of historical average annual temperature data of the Valuiki weather station

Статистические характеристики Statistical characteristics	Статистические характеристики Statistical characteristics			Статистические характеристики Statistical characteristics			Значения до 1988 г. Values before 1988		
	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
Среднее значение, °C Average value, °C	2,20	6,94	11,82	3,57	8,30	13,17	1,38	1,36	1,35
Стандартное отклонение, °C Standard deviation, °C	0,92	0,93	1,06	0,91	0,99	1,08	–0,01	0,06	0,01
Абсолютный минимум, °C Absolute minimum, °C	–0,39	4,70	8,77	1,81	6,20	10,81	2,20	1,49	2,04
Первый квартиль, °C First quartile, °C	1,66	6,35	11,26	2,92	7,57	12,41	1,25	1,22	1,15
Второй квартиль, °C Second quartile, °C	2,42	7,06	11,92	3,76	8,48	13,45	1,34	1,43	1,53
Третий квартиль, °C Third quartile, °C	2,74	7,52	12,41	4,25	8,96	13,87	1,51	1,44	1,46
Абсолютный максимум, °C Absolute maximum, °C	4,20	8,86	14,36	4,90	10,12	15,32	0,70	1,26	0,96

Общее заключение по данным метеостанций Готни, Богородицкого и Валуек

Анализ данных трех метеостанций, расположенных в одной области, демонстрирует согласованные климатические изменения, характерные для всего региона после 1988 г. Наблюдаемые тенденции отражают устойчивый сдвиг в сторону потепления, соответствующий глобальным климатическим трендам.

Рост минимальных температур

Наиболее выраженное повышение зафиксировано в минимальных температурах. Во всех трех локациях абсолютные минимумы выросли на 1,61–2,2 °C, а медианные значения — на 1,28–1,64 °C. Это указывает на сокращение экстремальных холодов и смягчение зимних и ночных температур.

Повышение средних температур

Среднегодовые температуры на всех метеостанциях выросли на 1,33–1,49 °C (медианные значения) и 1,27–1,42 °C (средние по выборке). Распределение средних значений сместилось вверх: в период до 1988 г. 75 % наблюдений не превышали 6,28–7,52 °C, тогда как после 1988 г. 25 % значений начинаются с 6,54–7,57 °C. Таким образом, подтверждается увеличение повторяемости теплых лет и сокращение более холодных периодов.

Динамика максимальных температур

Максимальные температуры демонстрируют меньшую изменчивость, но также растут. Медианные значения увеличились на 1,27–1,72 °C, а абсолютные максимумы — на 0,43–0,96 °C. Наименьший рост экстремальных максимумов (например, +0,53 °C в Готни) может быть связан с тем, что пиковые значения температур менее чувствительны к фоновому потеплению, чем минимумы.

Стабилизация разброса температур

Практически для всех станций характерно снижение стандартного отклонения минимальных температур (на 0,01–0,11), что свидетельствует о сокращении амплитуды экстремальных холодов. Для средних и максимальных температур разброс остался практически неизменным или незначительно увеличился, что согласуется с ростом их средних значений.

Выводы

Данные метеостанций подтверждают, что исследуемый регион переживает климатическую трансформацию, аналогичную глобальным процессам. Наиболее значимые изменения связаны с сокращением экстремальных холодов и ростом минимальных температур. Средние и максимальные температуры также повышаются, но их динамика менее выражена. Эти тенденции указывают на смещение климатических норм в сторону более мягких зим и устойчиво теплого лета, что также может иметь серьезные последствия для экосистем, сельского хозяйства и инфраструктуры региона. Согласованность сведений трех станций подчеркивает масштабность изменений и необходимость дальнейшего мониторинга для адаптации к новым климатическим реалиям.

С использованием программного обеспечения[5] для трех метеостанций выполнен расчет ключевых характеристик отопительного сезона, которые

[5] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682711 Российская Федерация. Программа для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных / *Шеремет Е.О., Семиненко А.С., Свирин М.В.*; заявитель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2022682110 от 17.11.2022; опубл. 25.11.2022.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

включали: дату начала и окончания отопительных периодов, продолжительность отопительных периодов, температуры наиболее холодных дней и наиболее холодных пятидневок отопительных периодов, средние температуры отопительных периодов, градусосутки отопительных периодов на всем протяжении наблюдений для трех метеостанций.

На рис. 2 показаны графики изменения продолжительности отопительных периодов для метеостанций Готни, Богородицкого и Валуек, расположенных в Белгородской области. Все графики демонстрируют волнообразную динамику, характерную для естественной климатической изменчивости. Однако с 1980-х гг. наблюдается устойчивая



Рис. 2. Продолжительность отопительных периодов Готни, Богородицкого и Валуек: long — фактическая продолжительность сезона по данным наблюдений; MAlong — сглаженные значения (10-летняя скользящая средняя)

Fig. 2. Duration of heating periods in Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki: long — actual season length according to observations; MAlong — smoothed values (10-year moving average)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

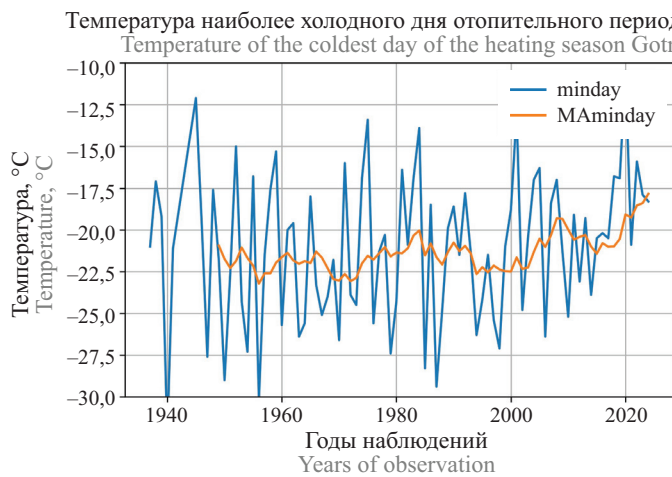
тенденция к сокращению как минимумов, так и максимумов продолжительности отопительного периода. Особенно выраженное снижение произошло с начала 2000 до 2010 г.: средние значения сократились со 195 до 180 дней для Готни, с 200 до 180 дней для Богородицкого и со 190 до 175 для Валуек. По данным на последние годы, средняя продолжительность отопительного периода стабилизировалась на уровне 180–185 дней, что на 10–15 дней меньше значений, характерных для середины XX в. Сокращение продолжительности отопительного периода согласуется с ранее выявленным ростом среднегодовых температур в регионе (табл. 2–4).

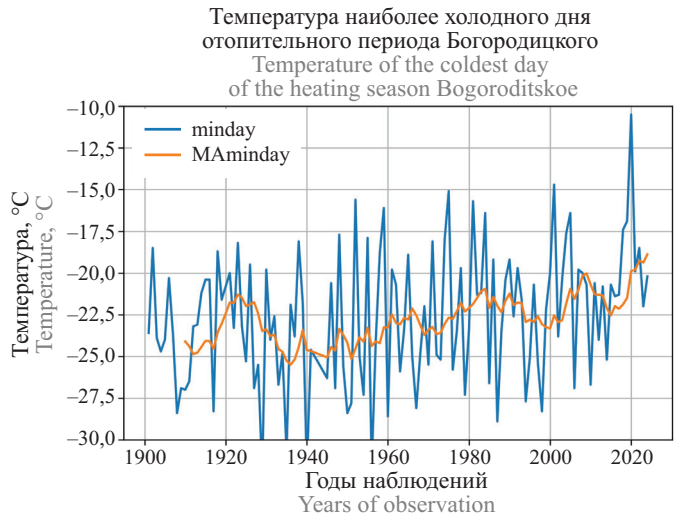
На рис. 3 показаны температурные характеристики самых холодных дней отопительного периода, которые демонстрируют неоднородную динамику на всех трех станциях наблюдения. В частности, данные метеостанции Готни отражают значительное увеличение амплитуды колебаний с 1970-х гг. В период 1950–1970-х гг. средние температуры наиболее холодных дней находились в диапазоне –23…–21 °C. С 2005 по 2023 г. температуры достигли диапазона –21,5…–19 °C. В 2019–2020 гг. зафиксирован рекорд: средняя температура наиболее холодного дня не опустилась ниже –10,5 °C.

Динамика температур Богородицкого аналогична общерегиональной тенденции. До 1970-х гг. экстремальные минимумы достигали –30,0 °C, а средние значения колебались в пределах 25…–21 °C. К 2000 гг. средние температуры холодных дней повысились до –23…–21 °C. В 2010–2023 гг. максимальные значения поднимаются выше –20 °C. Пиковые значения после 2010 г. демонстрируют сокращение амплитуды экстремальных холодов, что согласуется с ростом среднегодовых температур.

График метеостанции Валуек отражает значительное смягчение зимних температур. В 1950–1980 гг. температуры наиболее холодных дней варьировались в пределах –26…–22 °C. К 2000 гг. диапазон сместился до –23…–19 °C, а к 2020 — до –21…–17 °C. Скользящая средняя (MAminday) показывает снижение экстремальных минимумов на 5–6 °C за 70 лет наблюдений. В 2019–2020 гг. абсолютный минимум не превысил –15 °C, что на 8 °C выше значений середины XX в.

Данные трех метеостанций подтверждают устойчивое потепление в Белгородской области, особенно выраженное в зимний период. Рост температур наиболее холодных дней на 4–6 °C за последние 50 лет коррелирует с сокращением продол-





Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

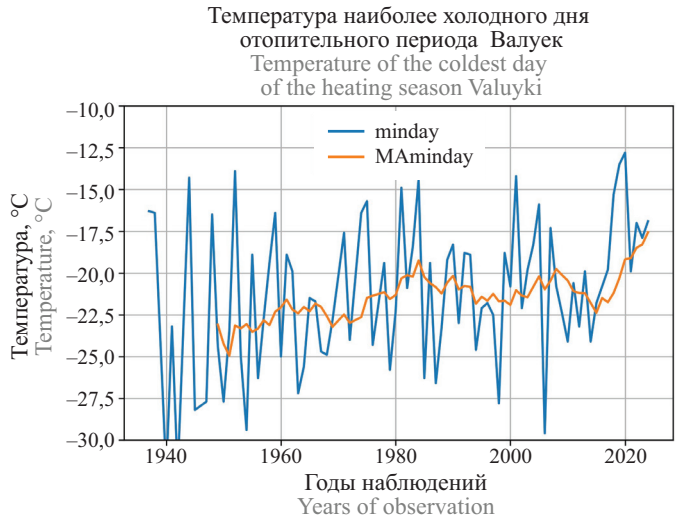


Рис. 3. Температуры наиболее холодных дней в течение отопительных периодов Готни, Богородицкого и Валуек: minday — минимальные суточные температуры; MAminday — сглаженные значения (10-летняя скользящая средняя)

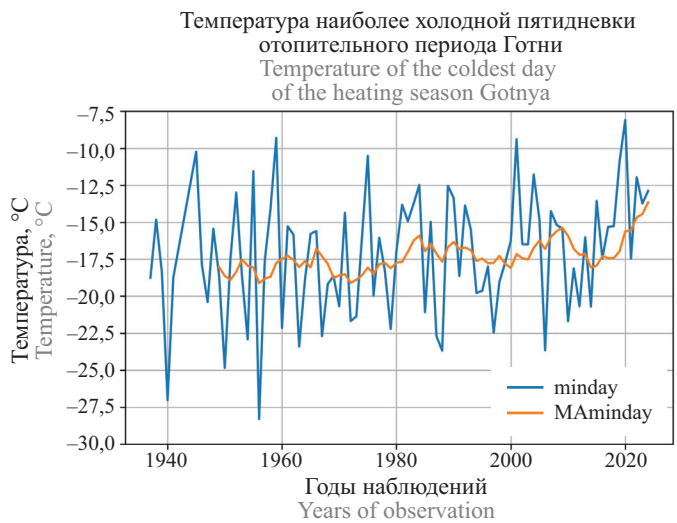
Fig. 3. Temperatures of the coldest days during the heating periods of Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki: minday — minimum daily temperatures; MAminday — smoothed values (10-year moving average)

жительности отопительного периода и повышением среднегодовых значений.

Рис. 4 отображает динамику температурных показателей наиболее холодных пятидневных периодов в течение отопительного сезона для метеостанций Готни, Богородицкое и Валуйки. Данные по станции Готни свидетельствуют о выраженной тенденции к уменьшению интенсивности экстремальных холодов. До 1980-х гг. температуры наиболее холодных пятидневок опускались до –25…–20 °С, а средние значения находились в диапазоне –19…–17 °С. С 1980-х по 2000-е гг. средние показатели повысились до –18…–16 °С, а экстремальные минимумы стали реже достигать –20 °С. В 2019–2020 гг. зафиксирован аномально теплый период: температура наиболее холодной пятидневки составила –8 °С, что на 10–12 °С выше значений середины XX в. Тренд показывает снижение экстремальных минимумов на 4–6 °С за последние 50 лет.

Динамика метеостанции Богородицкого схожа с общерегиональной. В 1960–1980 гг. средние температуры холодных пятидневок варьировались в пределах –20…–17 °С с точечными значениями ниже –23 °С. К 2000-м гг. скользящая средняя (MAminfday) стабилизировалась на уровне –12 °С. После 2010 г. экстремальные значения не превышают –18 °С, что указывает на сокращение продолжительности сильных морозов.

По данным метеостанции Валуек наблюдается значительное повышение температур. В 1950–1970 гг. минимальные значения достигали –24…–22 °С, а средние пятидневки находились в зоне –18…–17 °С. С 1980-х гг. средние показатели выросли до –17…–16 °С, а к 2020-м гг. до –15 °С. MAminfday подтверждает



Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

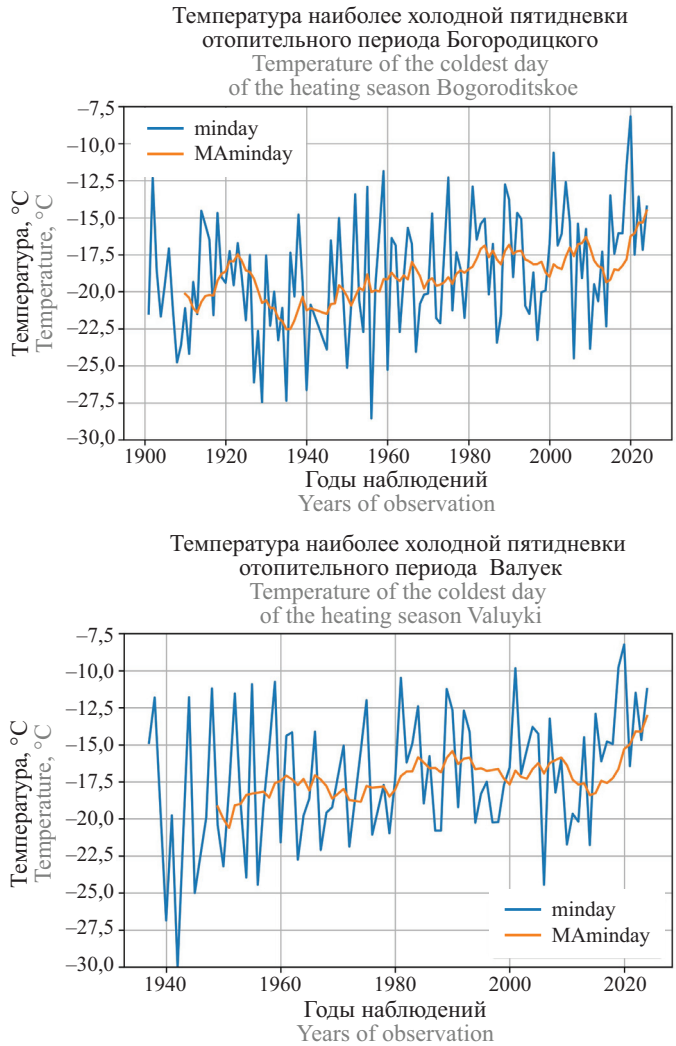


Рис. 4. Температуры наиболее холодных пятидневок в течение отопительных периодов Готни, Богородицкого и Валуек: minfday — минимальные пятидневные температуры; MAminfday — сглаженные значения (10-летняя скользящая средняя)

Fig. 4. Temperatures of the coldest five-day periods during the heating periods of Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki: minfday — minimum five-day temperatures; MAminfday — smoothed values (10-year moving average)

тренд: снижение экстремальных холодов более чем на 5 °С за 70 лет наблюдений.

Общий вывод

Данные всех трех метеостанций подтверждают, что с 1980-х гг. температуры наиболее холодных пятидневок в Белгородской области не опускаются ниже –18 °С. Это согласуется с ранее выявленным сокращением продолжительности отопительного периода (рис. 2) и ростом среднегодовых температур (табл. 2–4). Аномально теплые периоды, такие как 2019–2020 гг., когда минимальные пятидневки достигали –8 °С, подчеркивают ускорение климатических изменений. Эти тенденции снижают нагрузку на энергосистемы, но требуют адаптации инфраструктуры к более мягким зимам и пересмотра нормативов в строительстве.

Анализ динамики изменения температуры отопительных периодов (рис. 5) позволяет выявить устойчивую тенденцию к потеплению климата во всех трех локациях. На всем временном интервале наблюдается плавный рост средних температур, наиболее выраженный в последние десятилетия. Для Готни, как и в целом по региону, повышение температуры к 2020 г. по сравнению с серединой XX в. составило около 2 °С. В Богородицком и Валуйках аналогичный тренд подтверждается с некоторыми локальными отклонениями, характерными для микроклимата этих районов.

Пиковые значения средних температур отопительного периода зафиксированы в 2019–2020 гг. Для Готни этот показатель достиг 2,73 °С. В Богородицком максимальные значения также приблизились к 3 °С, демонстрируя синхронность климатических изменений на исследуемой территории, а в Валуйках максимальные показатели превысили эти значения.

Таким образом, график подтверждает значительное потепление в регионе, характерное для всех

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

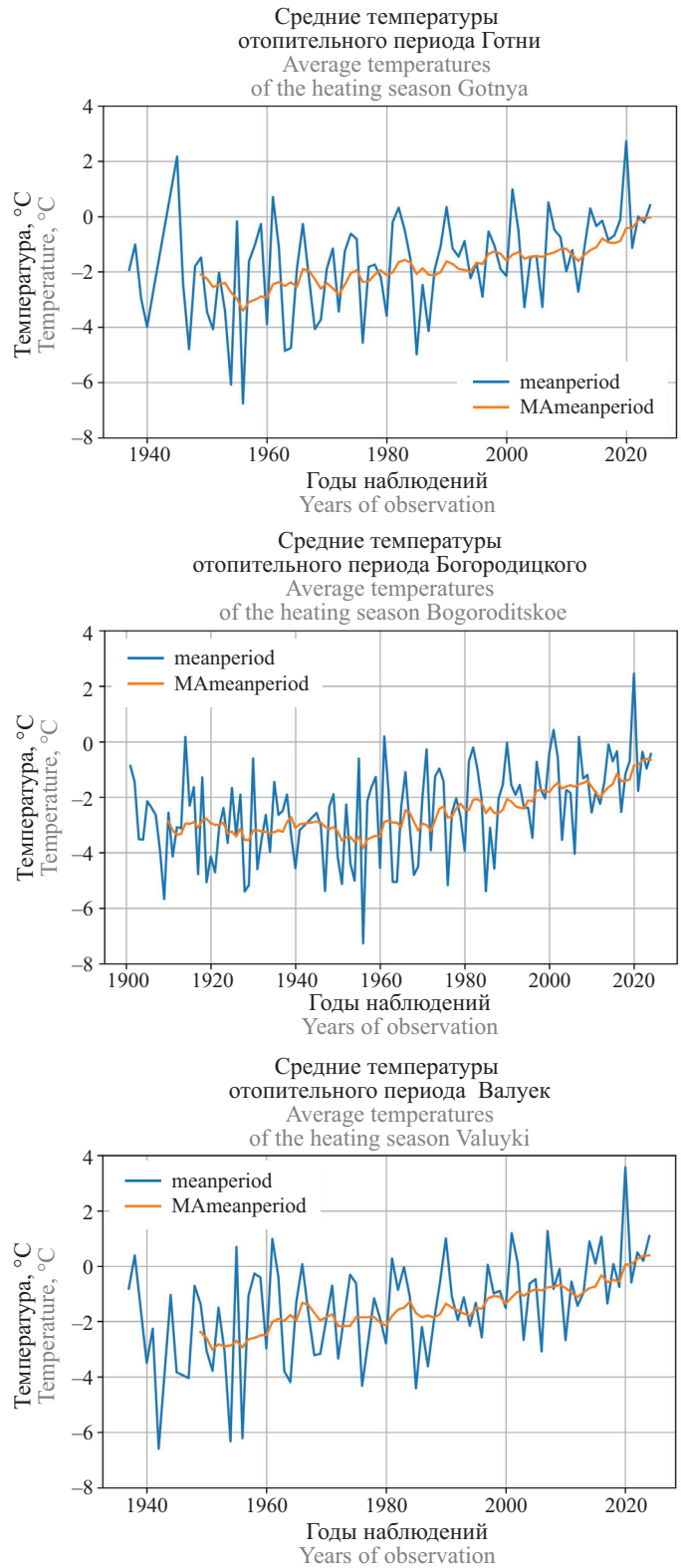


Рис. 5. Динамика средних температур отопительных периодов в Готне, Богородицком и Валуйках: meanperiod — по данным метеостанции; MAmeanperiod — сглаженные значения (10-летняя скользящая средняя)

Fig. 5. Dynamics of average temperatures of heating periods in Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki: meanperiod — according to weather station data; MAmeanperiod — smoothed values (10-year moving average)

трех населенных пунктов, и подчеркивает важность долгосрочного мониторинга для прогнозирования энергетических и экологических последствий.

На рис. 6 отображена динамика градусо-суток отопительного периода (ГСОП) для трех населенных пунктов — Готни, Богородицкого и Валуек. Анализ

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

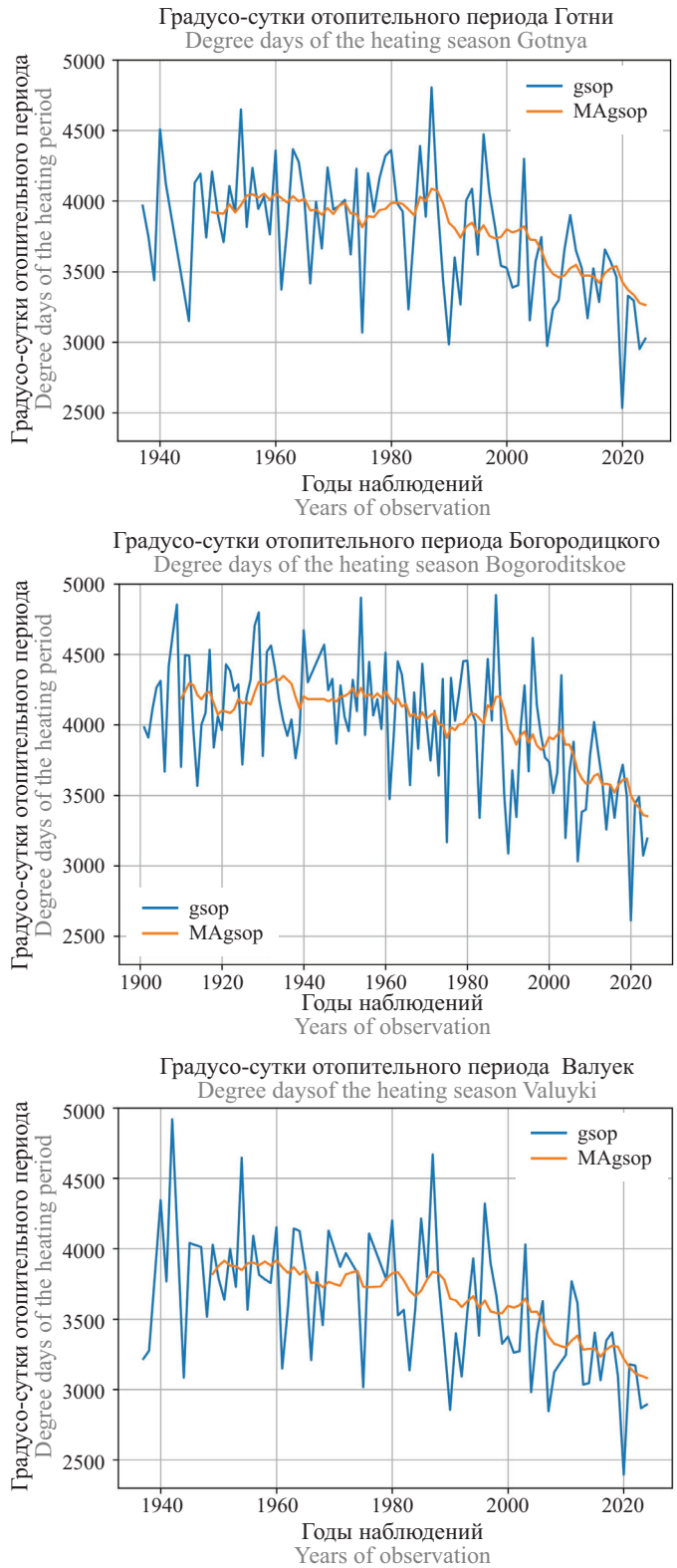


Рис. 6. Градусо-сутки отопительных периодов в Готне, Богородицком и Валуйках: gsop — по данным метеостанции; MAgsop — сглаженные значения (10-летняя скользящая средняя)

Fig. 6. Degree-days of heating periods in Gotnya, Bogoroditskoe and Valuyki: gsop — according to weather station data; MAgsop — smoothed values (10-year moving average)

показывает устойчивую тенденцию к снижению ГСОП во всех трех локациях, что связано с повышением средних температур в регионе. В середине XX в. (1950–1960 гг.) усредненные значения ГСОП для Готни находились в районе 4000, однако к 2010–2020 гг. этот показатель снизился до 3500–3400. Аналогичная

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

динамика наблюдается в Богородицком и Валуйках: начальные значения около 3900–4000 к 2020 г. уменьшились до 3100, что подтверждает общерегиональный тренд.

Снижение градусо-суток указывает на уменьшение энергетической потребности в отоплении, что имеет важное значение для планирования инфраструктуры и экологической политики. Тренд подтверждает связь между глобальным потеплением и трансформацией основных показателей отопительных сезонов в исследуемом регионе.

Таким образом, можно заключить, что на всех трех метеостанциях, обладающих достаточной глубиной архива данных в последние 30–35 лет, наблюдается значительное «потепление» климатических параметров, в частности холодного периода года.

На следующем этапе вычислялись температуры наиболее холодных пятидневок обеспеченностью 0,92 по методике, указанной в СП 131.13330.2020. В данном своде правил указано, что температура наиболее холодной пятидневки рассчитывается по обобщенному распределению экстремальных значений. Это распределение представляет собой обобщение распределений Гумбеля, Фреше и Вейбулла, которое используется для приближенного значения моделирования экстремумов конечных последовательностей случайных величин.

Так как в СП 131.13330.2020 отмечено, что климатические параметры холодного периода года были рассчитаны за период 1998–2018 гг., аналогичные годы были отобраны для расчета наиболее холодной пятидневки заданной обеспеченности.

Для расчета использовалась библиотека для научных исследований SciPy. С помощью подмодуля stats и функции genextreme, которая является реализацией функции обобщенного распределения экстремальных значений на языке Python, высчитывались температуры наиболее холодных пятидневок для каждой из метеостанций. Оценка параметров производилась с помощью метода максимального правдоподобия. Для реализации функции максимального правдоподобия использовался алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно, относящийся к одному из квазиньютоновских методов. Температуры наиболее холодных пятидневок представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, ни по одной из исследуемых станций не получена расчетная температура наиболее холодной пятидневки, указанной в последней редакции строительной климатологии. Тогда из трех метеостанций были отобраны минимальные температуры по каждому году, и по полученной выборке повторен расчет наиболее холодной пятидневки. Полученное значение составило –22,59 °С, максимально приближенное к наиболее холодной пятидневке метеостанции в Богородицком, но также не достигает расчетных –24 °С.

Следующий этап включал расчет наиболее холодных пятидневок для метеостанций с меньшей глубиной архива наблюдаемых данных. Обработаны сведения метеостанций Старого Оскола, Нового Оскола и Белгорода. Метеостанция Старого Оскола располагает данными с 2010 г., а метеостанции Нового Оскола и Белгорода с 2005 г. Посчитаны температуры обеспеченностей наиболее холодных пятидневок по каждой из станций, минимальные температуры по каждому году из 3 базовых метеостанций, а также из всех 6 метеостанций, включая базовые. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

На основании табл. 6 можно сделать вывод, что температура наиболее холодной пятидневки

Табл. 5. Базовые метеостанции с рассчитанной температурой наиболее холодных пятидневок обеспеченностью 0,92

Table 5. Basic weather stations with calculated temperatures of the coldest five-day periods with a provision of 0.92

Метеостанция Weather station	Температура наиболее холодной пятидневки обеспеченность 0,92, °С Temperature of the coldest five-day period is 0.92, °C
Готня Gotnya	–21,27
Богородицкое Bogoroditskoe	–22,58
Валуйки Valuyki	–21,87

Табл. 6. Метеостанции с рассчитанной температурой наиболее холодных пятидневок обеспеченностью 0,92

Table 6. Weather stations with calculated temperatures of the coldest five-day periods with a provision of 0.92

Метеостанция Weather station	Температура наиболее холодной пятидневки обеспеченность 0,92, °С Temperature of the coldest five-day period is 0.92, °C
Готня Gotnya	–21,27
Богородицкое Bogoroditskoe	–22,58

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Метеостанция Weather station	Температура наиболее холодной пятидневки обеспеченность 0,92, °С Temperature of the coldest five-day period is 0.92, °C
Валуйки Valuyki	–21,87
Наиболее холодные пятидневки по данным трех метеостанций The coldest five-day periods according to three weather stations	–22,59
Старый Оскол Stary Oskol	–22,06
Новый Оскол Novy Oskol	–24,07
Белгород Belgorod	–22,95
Наиболее холодные пятидневки по данным 6 метеостанций The coldest five-day periods according to 6 weather stations	–22,77

достигает расчетных –24 °С только по неполным за 20 лет данным метеостанции Нового Оскола, которая не отражает объективно рассчитанных метеорологических параметров в других населенных пунктах Белгородской области. Отличие в значениях на территории Белгородской области от других метеостанций составляет до 2,8 °С.

В попытке оправдать столько низкое расчетное значение для региона было сделано предположение, что стоит еще раз пересчитать значения наиболее холодных пятидневок метеостанций с неполными данными, дополнив их недостающие значения по годам значениями из близлежащих метеостанций с полным архивом данных. Таким образом, недостающая информация метеостанции Белгорода дополнялась сведениями метеостанции Готни. А данные метеостанций Старого Оскола и Нового Оскола дополнились сведениями метеостанции Богородицкого (табл. 7).

Как видно из табл. 7, полученные сведения также не достигают расчетного значения по данным последней редакции строительной климатологии.

Стоит отметить, что практическое применение каждого из видов распределений довольно сильно отличается в зависимости от сферы применения. Распределение Гумбеля позволяет анализировать максимумы и минимумы с экспоненциальными хвостами в сфере гидрологии и климатологии. Распределение Фреше используется для анализа распределений максимумов, чаще с тяжелыми, степенными хвостами в сфере финансов. Распределение Вейбулла применяется для анализа минимумов или максимумов с хвостами, ограниченными снизу, и чаще используется с целью оценки надежности в сфере инженерии. Для задач исследования наиболее холодных пятидневок исходя из опыта использования больше подходит распределение Гумбеля.

В рамках исследования экстремальных минимумов температур был применен метод бутстрэп-анализа для оценки параметров обобщенного распределения экстремальных значений и соответствующих доверительных интервалов.

Бутстрэп — непараметрический статистический метод, основанный на множественной повторной выборке с замещением из исходных данных. Этот метод дает возможность оценивать распределение выборочных статистик в условиях ограниченного объ-

Табл. 7. Метеостанции с неполным массивом данных с рассчитанной температурой наиболее холодных пятидневок обеспеченностью 0,92

Table 7. Weather stations with an incomplete data array with calculated temperatures of the coldest five-day periods with a provision of 0.92

Метеостанция Weather station	Температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, °С Temperature of the coldest five-day period is 0.92, °C
Белгород (дополненный данными Готни) Belgorod (supplemented with Gotney's data)	–21,45
Старый Оскол (дополненный данными Богородицкого) Stary Oskol (supplemented by Bogoroditsky's data)	–22,11
Новый Оскол (дополненный данными Богородицкого) Novy Oskol (supplemented by Bogoroditsky's data)	–22,34

ема данных, без предположений о форме исходного распределения. Метод может быть особенно эффективным для анализа устойчивости оценок в задачах с высокой стохастичностью, таких как, например, моделирование экстремальных значений.

Алгоритм реализации состоял из следующих этапов. Методом бутстрэп-анализа генерировалось 1000 выборок объемом n = 21 каждая путем случайного отбора наблюдений из преобразованных исходных данных с возвращением, что позволяет имитировать многократное повторение эксперимента в идентичных условиях. Для каждой бутстрэп-выборки производилась инверсия сведений для адаптации распределения минимумов к стандартной модели обобщенного распределения экстремальных значений, ориентированной на максимумы, с последующей оценкой параметров обобщенного распределения экстремальных значений методом максимального правдоподобия путем минимизации отрицательной логарифмической функции правдоподобия. На следующем этапе для каждой полученной модели рассчитывался заданный квантиль. На завершающем этапе для каждого параметра распределения и расчетного квантиля был вычислен 95 % доверительный интервал (табл. 8).

Следует отметить, что параметры и температура квантиля обеспеченностью 0,92, полученные в результате вычисления методом обобщенного

Табл. 8. Оценка параметров распределения экстремальных значений с рассчитанным квантилем и доверительные интервалы для метеостанций Белгородской области

Table 8. Estimation of the distribution parameters of extreme values with the calculated quantile and confidence intervals for meteorological stations of the Belgorod region

Параметры распределения Distribution parameters	Значение 95%-ного доверительного интервала 95 % Confidence Interval Value	Параметры, рассчитанные с помощью обобщенного распределения экстремальных значений по каждой метеостанции Parameters calculated using the generalized distribution of extreme values for each weather station
Белгород (дополненный данными Готни) *Belgorod (supplemented with Gotney's data)*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,154, 0,292]	–0,263
Параметр локации Location parameter	[–19,737, –14,231]	–15,521
Параметр масштаба Scale parameter	[1,488, 4,766]	3,250
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–23,611, –19,052]	–21,45 °C
Старый Оскол (дополненный данными Богородицкого) *Stary Oskol (supplemented by Bogoroditsky's data)*		
Параметр формы Shape parameter	[–2,145, 0,069]	–0,273
Параметр локации Location parameter	[–23,286, –14,946]	–16,321
Параметр масштаба Scale parameter	[1,926, 4,267]	3,2113
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,493, –19,821]	–22,11 °C
Новый Оскол (дополненный данными Богородицкого) *Novy Oskol (supplemented by Bogoroditsky's data)*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,255, 0,333]	–0,260
Параметр локации Location parameter	[–19,889, –14,845]	–16,263
Параметр масштаба Scale parameter	[1,596, 5,564]	3,322
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–23,941, –20,025]	–22,34 °C
Новый Оскол *Novy Oskol*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,328, 8,255]	–0,087

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Продолжение табл. 8 / Continuation of the Table 8

Параметры распределения Distribution parameters	Значение 95%-ного доверительного интервала 95 % Confidence Interval Value	Параметры, рассчитанные с помощью обобщенного распределения экстремальных значений по каждой метеостанции Parameters calculated using the generalized distribution of extreme values for each weather station
Новый Оскол *Novy Oskol*		
Параметр локации Location parameter	[–21,150, –15,037]	–16,963
Параметр масштаба Scale parameter	[0,294, 5,732]	2,9614
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–1,20215231*e* + 07, –1,96008719*e* + 01]	–23,58 °C
Старый Оскол *Stary Oskol*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,416, 6,475]	–0,638
Параметр локации Location parameter	[–20,708, –13,565]	–17,828
Параметр масштаба Scale parameter	[3,03127564*e* – 14, 4,86439888*e* + 00]	3,214
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–2,81533242*e* + 06, –1,35650000*e* + 01]	–21,83 °C
Валуйки *Valuyki*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,148, 0,475]	–0,201
Параметр локации Location parameter	[–18,114, –14,144]	–15,485
Параметр масштаба Scale parameter	[1,579, 4,552]	3,232
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,218, –19,467]	–21,81 °C
Белгород *Belgorod*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,262, 0,580]	–0,260
Параметр локации Location parameter	[–19,732, –14,834]	–16,263
Параметр масштаба Scale parameter	[1,5287, 5,294]	3,322
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,150, –19,766]	–22,34 °C
Готня *Gotnya*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,135, 0,311]	–0,266
Параметр локации Location parameter	[–17,408, –14,129]	–15,477
Параметр масштаба Scale parameter	[1,388, 4,912]	3,208
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–23,340, –18,827]	–21,31 °C
Богородицкое *Bogoroditskoe*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,237, 0,334]	–0,246

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

Окончание табл. 8 / End of the Table 8

Параметры распределения Distribution parameters	Значение 95%-ного доверительного интервала 95 % Confidence Interval Value	Параметры, рассчитанные с помощью обобщенного распределения экстремальных значений по каждой метеостанции Parameters calculated using the generalized distribution of extreme values for each weather station
Богородицкое *Bogoroditskoe*		
Параметр локации Location parameter	[–20,182, –14,749]	–16,338
Параметр масштаба Scale parameter	[1,507, 5,036]	3,325
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,485, –20,121]	–22,52 °C
Наиболее холодные пятидневки 3 метеостанций *The coldest five-day periods of 3 weather stations*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,961, 0,443]	–0,241
Параметр локации Location parameter	[–23,102, –15,136]	–16,476
Параметр масштаба Scale parameter	[1,606, 4,641]	3,240
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,495, –20,128]	–22,53 °C
Наиболее холодные пятидневки 6 метеостанций *The coldest five-day periods 6 weather stations*		
Параметр формы Shape parameter	[–1,943, 0,198]	–0,271
Параметр локации Location parameter	[–22,670, –15,309]	–16,689
Параметр масштаба Scale parameter	[1,743, 4,976]	3,330
Квантиль 0,92 Quantile 0.92	[–24,492, –20,260]	–22,71 °C

распределения экстремальных значений, находятся внутри доверительных интервалов соответствующих значений. Также стоит обратить внимание на то, что доверительные интервалы параметра формы обобщенного экстремального распределения включают ноль для всех метеостанций. Это указывает на то, что гипотеза о принадлежности данных к распределению Гумбеля не может отвергаться статистически, что позволяет в дальнейшем рассматривать распределение Гумбеля как частный случай обобщенного распределения экстремальных значений, который может быть более подходящим для анализа экстремальных значений, по крайней мере, для исследуемых метеостанций, что подтверждает обоснованность применения данного распределения в некоторых западных нормах. Для Нового Оскола и Старого Оскола параметр формы демонстрирует широкие доверительные интервалы, которые могут возникать вследствие малого объема данных, также из-за этого возникает неустойчивость оценок метода максимального правдоподобия в расчете оценок для параметра формы, что отражается на расчете доверительного интервала для квантиля, который показывает значительный диапазон возможных значений. Все это в совокупности говорит о том, что данные метеостанции Нового Оскола не могут быть расчетными для определения температуры наиболее холодной пятидневки региона заданной обеспеченности. Таким образом, на основании информации метеостанций, а также по полученным экспериментальным сведениям расчетная температура для холодного периода –24 °C является заниженной для Белгородского региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обработаны массивы температурных данных всех метеостанций Белгородской области на всем интервале исторических наблюдений. Выявлено, что температурные изменения на территории Белгородской области соответствуют глобальным трендам планетарного потепления. Рассчитаны ключевые параметры отопительных периодов на всех метеостанциях региона, проанализированы такие параметры, как продолжительность отопительных периодов, температура наиболее холодных дней отопительных периодов, температура наиболее хо-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

лодных пятидневок отопительных периодов, средние температуры отопительных периодов, градусосутки отопительных периодов. На основании полученной информации сделан вывод, что в последние 30–35 лет наблюдается значительное «потепление» климатических параметров, в том числе холодной половины года.

На базе методики, указанной в последней редакции строительной климатологии, с использованием инструментов на языке программирования Python вычислены температуры наиболее холодных пятидневок обеспеченностью 0,92. Полученные данные показали, что указанная в СП расчетная температура региона, равная –24 °С, является необоснованно заниженной. Приведены экспериментально рассчитанные температуры наиболее холодных пятидневок для каждой метеостанции, а также сведения по группировке самых низких температур для 3 метеостанций с наибольшей глубиной наблюдений и всех 6 метеостанций на территории региона. С помощью бутстрэпа вычислялись 95%-ные доверительные интервалы для параметров обобщенного распределения экстремальных значений и заданного квантиля. Один из главных выводов при расчете доверительных интервалов — включение в доверительный интервал нуля при расчете параметра формы, которое непосредственно влияет на выбор распределения, что может говорить о потенциальном использовании распределения Гумбеля, как о более подходящем распределении при расчете обеспеченности, что подтверждается использованием данного распределения для вычисления расчетных температур отопительного периода в западных нормах. Другим недостатком обобщенного распределения экстремальных значений могут считаться достаточно большие интервалы параметров локации и масштаба, что говорит о том, что на небольших выборка (порядка 20 значений или меньше) это распределение может давать неустойчивые оценки.

Согласно проведенным исследованиям, единая расчетная температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 для всего региона составляет –23 °С (на основе анализа данных шести метеостанций). Однако авторы считают более обоснованным дифференцированный подход с учетом пространственной неоднородности температурного режима. На основании анализа многолетних наблюдений предлагается: для метеостанций Готни, Белгорода и Валуек установить расчетную температуру –22 °С; для метеостанции Богородицкое и северо-восточных территорий области сохранить значение –23 °С.

Данное понижение температуры может сказаться на реконструкции зданий, для которых невозможно утепление стен снаружи. Снижение сопротивления в зависимости от географии применения в пределах региона может достигать около 2–5 %, что сможет упростить соответствие нормам существующих зданий. Расчетные теплопотери также могут снизиться на 2–5 %, что приведет к уменьшению требуемой мощности отопительных систем и соответственно сэкономит ресурсы при проектировании новых зданий. Кроме того, региональная адаптация внутри области сможет повысить точность расчетов.

Однако стоит учесть, что уменьшение требований к ограждающим конструкциям может привести к более высоким эксплуатационным расходам в долгосрочной перспективе. Помимо этого, в расчете зданий необходимо учитывать инерционность ограждающих конструкций. Легкие конструкции с низкой инерционностью более чувствительны к кратковременным похолоданиям.

Целью настоящего исследования являлась не корректировка нормативных значений расчетной температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 в меньшую сторону, а выявление несовершенства существующей методологии, возможной ошибки в имеющихся расчетных значениях для Белгородской области, а также предложение и мотивация к разработке методологической основы для повышения точности оценки квантилей распределения экстремально низких температур, что в дальнейшем создаст основу для перехода от усредненных климатических норм к персонализированным решениям в строительстве, что особенно актуально в условиях растущих требований к энергоэффективности и устойчивости инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Hansen J.E., Sato M., Simons L., Nazarenko L.S., Sangha I., Kharecha P. et al.* Global warming in the pipeline // Oxford Open Climate Change. 2023. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1093/oxfclm/kgad008

2. *Cho H.H., Strezov V., Evans T.J.* A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies // Sustainable Materials and Technologies. 2023. Vol. 35. P. e00567. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00567

3. *Scafetta N.* Impacts and risks of "realistic" global warming projections for the 21st century // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15. Issue 2. P. 101774. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101774

4. *Patel V.K., Kuttippurath J.* Increase in tropospheric water vapor amplifies global warming and climate change // Ocean-Land-Atmosphere Research. 2023. Vol. 2. DOI: 10.34133/olar.0015

5. *Bai H., Xiao D., Liu D.L., Tao F., Liu F., Tang J.* Impacts of future climate change and management practices to yield, eco-efficiency and global warming potential for rice–wheat rotation system // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2025. Vol. 105. Issue 11. Pp. 6138–6150. DOI: 10.1002/jsfa.14322

6. *Wu S., Chao Q., Gao J., Liu L., Feng A., Deng H. et al.* Identification of regional pattern of climate change risk in China under different global warming targets //

Journal of Geographical Sciences. 2023. Vol. 33. Issue 3. Pp. 429–448. DOI: 10.1007/s11442-023-2090-1

7. *Diffenbaugh N.S., Barnes E.A.* Data-driven predictions of the time remaining until critical global warming thresholds are reached // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2023. Vol. 120. Issue 6. DOI: 10.1073/pnas.2207183120

8. *You Q., Jiang Z., Yue X., Guo W., Liu Y., Cao J. et al.* Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5 °C and 2 °C // Npj Climate and Atmospheric Science. 2022. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1038/s41612-022-00303-0

9. *Song F., Zhang G.J., Ramanathan V., Leung L.R.* Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2022. Vol. 119. Issue 6. DOI: 10.1073/pnas.2117832119

10. *Samset B.H., Lund M.T., Fuglestvedt J.S., Wilcox L.J.* 2023 temperatures reflect steady global warming and internal sea surface temperature variability // Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1038/s43247-024-01637-8

11. *Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V.* The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 237. Pp. 322–330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322. EDN QSSESC.

12. *Лупей А.Г.* О диагностике состояния систем отопления потребителей тепловой энергии // СОК. 2004. № 8. С. 48–52.

13. *Elistratova Y., Seminenko A., Elistratov D., Sheps R., Umerenkov A.* Reliability of Methods of Calculation of Heating Systems for Digital Model // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 31–39. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6_4

14. *Трухний А.Д., Зройчиков Н.А., Ломакин Б.В., Седов И.В.* Информационно-диагностическая система контроля подогревателей сетевой воды турбоустановки Т-250/300-240 // Теплоэнергетика. 1998. № 1. С. 30–34. EDN WNFXXD.

15. *Tol H.İ., Desmedt J., Salenbien R.* A novel demand-responsive control strategy for district heating systems, featuring return temperature reduction // Energy and Built Environment. 2021. Vol. 2. Issue 1. Pp. 105–125. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.05.001

16. *Khlebnikova E.I., Sall' I. A., Shkol'nik I.M.* Regional climate changes as the factors of impact on the objects of construction and infrastructure // Russian Meteorology and Hydrology. 2012. Vol. 37. Issue 11–12. Pp. 735–745. DOI: 10.3103/S1068373912110076. EDN RGGFPF.

17. *Li Y., Wang W., Wang Y., Xin Y., He T., Zhao G.* A Review of Studies Involving the Effects of Climate Change on the Energy Consumption for Building Heating and Cooling // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 18. Issue 1. P. 40. DOI: 10.3390/ijerph18010040

18. *Shi Y., Wang G., Gao X., Xu Y.* Effects of climate and potential policy changes on heating degree days in current heating areas of China // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-018-28411-z

19. *Andrade C., Mourato S., Ramos J.* Heating and cooling degree-days climate change projections for Portugal // Atmosphere. 2021. Vol. 12. Issue 6. P. 715. DOI: 10.3390/atmos12060715

20. *Chidiac S.E., Yao L., Liu P.* Climate change effects on heating and cooling demands of buildings in Canada // CivilEng. 2022. Vol. 3. Issue 2. Pp. 277–295. DOI: 10.3390/civileng3020017

21. *Janković A., Podraščanin Z., Djurdjevic V.* Future climate change impacts on residential heating and cooling degree days in Serbia // Időjárás. 2019. Vol. 123. Issue 3. Pp. 351–370. DOI: 10.28974/idojaras.2019.3.6

22. *Самарин О.Д.* Выбор расчетной температуры наружного воздуха в холодный период года с обоснованной обеспеченностью // Жилищное строительство. 2022. № 3. С. 36–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-36-39. EDN HESWFT.

23. *Малявина Е.Г., Ландырев С.С.* Роль сопротивления теплопередаче окна в формировании результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 7. С. 1161–1172. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1161-1172. EDN OLMXXQ.

24. *Мильков Д.А., Юферев Ю.В., Тютюнников А.И., Горшков А.С.* Изменение климата и его влияние на инженерно-энергетический комплекс (на примере Санкт-Петербурга) // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 87–96. DOI: 10.56304/S0040363623030049. EDN CTNQTJ.

25. *Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.* Изменение параметров отопительного периода на европейской территории России в результате глобального потепления // Известия РАН. Энергетика. 2002. № 2. С. 10–27.

26. *Клименко В.В., Клименко А.В., Андрейченко Т.Н.* Энергия, природа и климат. М. : Изд-во МЭИ, 1997. 214 с.

27. *Klimenko V.V., Mikushina O.V., Larin D.A.* Temperature changes in Taimyr region in the context of global climate change // Geoekol., Inzh. Geol., Gidrogeol., Geokriol. 2001. No. 3. Pp. 195–203.

28. *Klimenko V.V., Dovgalyuk V.V., Mikushina O.V.* Forecast of climate change in the Moscow region under the influence of anthropogenic and natural factors // Vestnik MEI. 2001. Vol. 2. Pp. 36–45.

29. *Шеремет Е.О., Старченко С.Ф.* Исследование изменения основных расчетных параметров отопительного периода по архиву температур // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 6. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31. EDN TSGHCS.

Поступила в редакцию 14 мая 2025 г.
Принята в доработанном виде 6 октября 2025 г.
Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

Об авторах: **Евгений Олегович Шеремет** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-код: 8433-6883, РИНЦ ID: 798155, Scopus: 57201772791, ResearcherID: NAZ-5556-2025, ORCID: 0000-0002-5716-8758; 66910@mail.ru;

Валерий Анатольевич Уваров — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-код: 3790-5739, РИНЦ ID: 456690, Scopus: 7006666298, ORCID: 0000-0003-3614-8536; v_a_uvarov@mail.ru;

Николай Юрьевич Никулин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-код: 5453-9273, РИНЦ ID: 1144898, ResearcherID: AAF-9961-2022, ORCID: 0000-0003-3433-3957; Nick_973gt@mail.ru;

Алена Анатольевна Шеремет — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-код: 3911-5720, РИНЦ ID: 1074377, ORCID: 0000-0002-5115-4785; aleenisokay@ya.ru;

Никита Юрьевич Саввин — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-код: 9439-3555, РИНЦ ID: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.ru.

Вклад авторов:
Шеремет Е.О. — научное руководство, обзор современного состояния вопроса, концепция исследования, разработка программы исследований и ее реализация, написание исходного текста, итоговые выводы.
Уваров В.А. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.
Никулин Н.Ю. — обзор современного состояния вопроса, итоговые выводы.
Шеремет А.А. — обзор современного состояния вопроса, концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.
Саввин Н.Ю. — обзор современного состояния, доработка текста, итоговые выводы.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Hansen J.E., Sato M., Simons L., Nazarenko L.S., Sangha I., Kharecha P. et al. Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change.* 2023; 3(1). DOI: 10.1093/oxfclm/kgad008

2. Cho H.H., Strezov V., Evans T.J. A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies. *Sustainable Materials and Technologies.* 2023; 35:e00567. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00567

3. Scafetta N. Impacts and risks of "realistic" global warming projections for the 21st century. *Geoscience Frontiers.* 2024; 15(2):101774. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101774

4. Patel V.K., Kuttippurath J. Increase in tropospheric water vapor amplifies global warming and climate change. *Ocean-Land-Atmosphere Research.* 2023; 2. DOI: 10.34133/olar.0015

5. Bai H., Xiao D., Liu D.L., Tao F., Liu F., Tang J. Impacts of future climate change and management practices to yield, eco-efficiency and global warming potential for rice–wheat rotation system. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 2025; 105(11):6138-6150. DOI: 10.1002/jsfa.14322

6. Wu S., Chao Q., Gao J., Liu L., Feng A., Deng H. et al. Identification of regional pattern of climate change risk in China under different global warming targets. *Journal of Geographical Sciences.* 2023; 33(3):429-448. DOI: 10.1007/s11442-023-2090-1

7. Diffenbaugh N.S., Barnes E.A. Data-driven predictions of the time remaining until critical global warming thresholds are reached. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2023; 120(6). DOI: 10.1073/pnas.2207183120

8. You Q., Jiang Z., Yue X., Guo W., Liu Y., Cao J. et al. Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5 °C and 2 °C. *Npj Climate and Atmospheric Science.* 2022; 5(1). DOI: 10.1038/s41612-022-00303-0

9. Song F., Zhang G.J., Ramanathan V., Leung L.R. Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2022; 119(6). DOI: 10.1073/pnas.2117832119

10. Samset B.H., Lund M.T., Fuglestvedt J.S., Wilcox L.J. 2023 temperatures reflect steady global warming and internal sea surface temperature variability. *Communications Earth & Environment.* 2024; 5(1). DOI: 10.1038/s43247-024-01637-8

11. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V. The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes. *Journal of Mining Institute.* 2019; 237:322-330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322. EDN QSSESC.

12. Lupey A.G. On diagnostics of the state of heating systems for consumers of thermal energy. *COK.* 2004; 8:48-52. (rus.).

13. Elistratova Y., Seminenko A., Elistratov D., Sheps R., Umerenkov A. Reliability of Methods of Calculation of Heating Systems for Digital Model. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2024; 31-39. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6_4

14. Trukhnii A.D., Zroichikov N.A., Lomakin B.V., Sedov I.V. An information-diagnostics system for monitoring the hot water heat exchangers of a T-250/300-240 turbine installation. *Thermal Engineering.* 1998; 1:30-34. EDN WNFXXD. (rus.).

15. Tol H.İ., Desmedt J., Salenbien R. A novel demand-responsive control strategy for district heating systems, featuring return temperature reduction. *Energy and Built Environment.* 2021; 2(1):105-125. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.05.001

16. Khlebnikova E.I., Sall' I. A., Shkol'nik I.M. Regional climate changes as the factors of impact on the objects of construction and infrastructure. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2012; 37(11-12):735-745. DOI: 10.3103/S1068373912110076. EDN RGGFPF.

17. Li Y., Wang W., Wang Y., Xin Y., He T., Zhao G. A Review of Studies Involving the Effects of Climate Change on the Energy Consumption for Building Heating and Cooling. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2020; 18(1):40. DOI: 10.3390/ijerph18010040

18. Shi Y., Wang G., Gao X., Xu Y. Effects of climate and potential policy changes on heating degree days in current heating areas of China. *Scientific Reports.* 2018; 8(1). DOI: 10.1038/s41598-018-28411-z

19. Andrade C., Mourato S., Ramos J. Heating and cooling degree-days climate change projections for Portugal. *Atmosphere.* 2021; 12(6):715. DOI: 10.3390/atmos12060715

20. Chidiac S.E., Yao L., Liu P. Climate change effects on heating and cooling demands of buildings in Canada. *CivilEng.* 2022; 3(2):277-295. DOI: 10.3390/civileng3020017

21. Janković A., Podraščanin Z., Djurdjevic V. *Future climate change impacts on residential heating and cooling degree days in Serbia. Időjárás.* 2019; 123(3):351-370. DOI: 10.28974/idojaras.2019.3.6

22. Samarin O.D. Selection of the design outdoor air temperature in the cold periodof the year with reasonable security. *Housing Construction.* 2022; 3:36-39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-36-39. EDN HESWFT. (rus.).

23. Malyavina E.G., Landyrev S.S. The role of heat transfer resistance of a window in formation of resulting temperature at the boundary of habitable space in a room. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1161-1172. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1161-1172. EDN OLMXXQ. (rus.).

24. Mil'kov D. A., Yuferev Yu.V., Tyutyunnikov A.I., Gorshkov A.S. Climate change and its influence on the energy engineering complex (taking St. Petersburg as an example). *Teploenergetika.* 2023; 3:87-96. DOI: 10.56304/S0040363623030049. EDN CTNQTJ. (rus.).

25. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. Changes in the parameters of the heating period in the European territory of Russia as a result of global warming. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering.* 2002; 2:10-27. (rus.).

26. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Andreichenko T.N. *Energy, nature and climate.* Moscow, MPEI Publishing House, 1997; 217. (rus.).

27. Klimenko V.V., Mikushina O.V., Larin D.A. Tem perature changes in Taimyr region in the context of glo bal climate change. *Geoekol., Inzh. Geol., Gidrogeol., Geokriol.* 2001; 3:195-203.

28. Klimenko V.V., Dovgalyuk V.V., Mikushina O.V. Forecast of climate change in the Moscow region under the influence of anthropogenic and natural factors. *Vestnik MEI.* 2001; 2:36-45.

29. Sheremet E., Starchenko S. Investigation of changes in the main design parameters of the heating period according to the temperature archive. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov.* 2024; 6:19-31. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31. EDN TSGHCS. (rus.).

Received May 14, 2025.
Adopted in revised form on October 6, 2025.
Approved for publication on October 8, 2025.

Bionotes: **Evgeniy O. Sheremet** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 8433-6883, ID RSCI: 798155, Scopus: 57201772791, ResearcherID: NAZ-5556-2025, ORCID: 0000-0002-5716-8758; 66910@mail.ru;

Valeriy A. Uvarov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 3790-5739, ID RSCI: 456690, Scopus: 7006666298, ORCID: 0000-0003-3614-8536; v_a_uvarov@mail.ru;

Nikolaj Yu. Nikulin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 5453-9273, ID RSCI: 1144898, ResearcherID: AAF-9961-2022, ORCID: 0000-0003-3433-3957; Nick_973gt@mail.ru;

Alena A. Sheremet — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architectural Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 3911-5720, ID RSCI: 1074377, ORCID: 0000-0002-5115-4785; aleenisokay@ya.ru;

Nikita Yu. Savvin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 9439-3555, ID RSCI: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.ru.

Authors' contribution:
Evgeniy O. Sheremet — scientific management, review of the current state of the issue, research concept, development of a research program and its implementation, writing the original text, final conclusions.
Valeriy A. Uvarov — scientific supervision, research concept, final conclusions.
Nikolaj Yu. Nikulin — review of the current state of the issue, participation in the development of the research program and implementation, text revision, final conclusions.
Alena A. Sheremet — review of the current state of the issue, research concept, writing the original text, final conclusions.
Nikita Yu. Savvin — review of the current state, revision of the text, final conclusions.
The authors declare no conflict of interest.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 69.057.47:624.21
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1767-1781

Разработка быстроразвертываемой технологии бескранового монтажа временных пролетных строений

Надежда Владимировна Розанцева
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость создания технологии быстрого монтажа временных мостов в чрезвычайных ситуациях привела к разработке нового метода бескранового монтажа. Цель исследования — создание эффективной технологии монтажа сборно-разборного временного большепролетного строения для быстрой установки в сложных условиях без использования крановой техники. Предложен инновационный подход к монтажу пролетных конструкций с помощью модульной сборки. Технология основана на сочетании действия гидравлических домкратов и лебедки и обладает высокой вариативностью. Дальнейшая разработка открывает новые возможности в области сокращения продолжительности обустройства временных проездных/проходных мостов в случае возникновения непредвиденных ситуаций.
Материалы и методы. Исследованы традиционные методы монтажа. Выбрано оптимальное конструктивное решение — перекрестно-балочное из композитных материалов на основании проведенных расчетов в программе SCAD, использованное в качестве грузовой нагрузки при расчете подъемных гидроцилиндров. Разработана технология бескранового монтажа с подъемной рамой на рельсовых направляющих. Расчетами подтверждено, что данное решение технически осуществимо, обладает необходимым запасом прочности, надежности и безопасности эксплуатации.
Результаты. Созданы конструкции временных пролетов из композитных материалов с узлами точной стыковки. В программе SCAD++ выполнено 3D-моделирование и анализ нагрузок. Выбрана оптимальная перекрестно-балочная конструкция. Создан внешний корпус для транспортировки и монтажа. Технология адаптирована для работы с земли или воды, с целью синхронности производства работ на системе предполагается установка компьютерного управления, подходит для городской застройки и чрезвычайных ситуаций. Внедрение технологии сокращает сроки монтажа и стоимость строительства, в том числе и за счет экономии от неприменения тяжелой спецтехники, на 15–25 %.
Выводы. Разработана технология бескранового монтажа мостовых пролетов до 50 м с применением гидравлических домкратов и лебедок. Технология дает возможность быстро монтировать конструкции в любых условиях, включая аварийное восстановление. Верхнее ортотропное покрытие увеличивает несущую способность и предотвращает скольжение транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бескрановый монтаж, перекрестно-балочные пролеты, перекрестно-стержневые пролеты, ортотропное покрытие, композитные материалы, модульная сборка, гидравлические домкраты, лебедки

Благодарности. Статья публикуется по результатам выполнения гранта НПР СПбГАСУ 2025 г. Автор выражает благодарность ООО «ПЕРИ», а также рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Розанцева Н.В.* Разработка быстроразвертываемой технологии бескранового монтажа временных пролетных строений // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1767–1781. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1767-1781

Автор, ответственный за переписку: Надежда Владимировна Розанцева, nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

Development and optimization of technology for crane-free installation of bridge superstructures

Nadezhda V. Rozantseva
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The need to create a technology for the rapid installation of temporary bridges in emergency situations has led to the development of a new method of crane-free installation. The purpose of the work is to create an effective technol-

© Н.В. Розанцева, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

ogy for the installation of a collapsible temporary large — span structure for quick installation in difficult conditions without the use of crane equipment. Scientific novelty — an innovative approach to the installation of superstructures using modular assembly is proposed. The technology is based on a combination of hydraulic jacks and a winch and is highly variable. Further development opens up new opportunities for reducing the duration of temporary road/footbridge construction in the event of unforeseen situations.

Materials and methods. Traditional installation methods were studied. The optimal design solution was selected — a cross-beam made of composite materials based on calculations performed in the SCAD programme, used as a load when calculating lifting hydraulic cylinders. A crane-free mounting technology with a lifting frame on rail rails was developed. Calculations have confirmed that this solution is technically feasible and has the necessary margin of safety, reliability and safety of operation.

Results. Temporary span structures made of composite materials with precise docking points have been created. The SCAD++ programme performs 3D modelling and load analysis. The optimal cross-beam structure was selected. An external housing was developed for transportation and installation. The technology is adapted to work from land or water, computer control is supposed to be installed on the system for synchronicity of work, and it is suitable for urban development and emergency situations. The introduction of the technology reduces the time of installation and the cost of construction, including by saving from the non-use of heavy machinery by 15–25 %.

Conclusions. The technology of crane-free installation of bridge spans up to 50 m using hydraulic jacks and winches has been developed. The technology allows you to quickly mount structures in any conditions, including disaster recovery. The upper orthotropic coating increases the load-bearing capacity and prevents vehicles from sliding.

KEYWORDS: frameless mounting, cross-girder spans, cross-rod spans, orthotropic coating, composite materials, modular assembly, hydraulic jacks, winches

Acknowledgments. The article is published based on the results of the implementation of the grant of the scientific and practical work of SPbGASU in 2025. The author expresses gratitude to “PERI” LLC and the reviewers.

FOR CITATION: Rozantseva N.V. Development and optimization of technology for crane-free installation of bridge superstructures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1767-1781. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1767-1781 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda V. Rozantseva, nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

ВВЕДЕНИЕ

Мостостроение — уникальное сочетание инженерного искусства и архитектуры. Оно имеет глубокие исторические корни и является одним из самых сложных видов строительства. Каждый мост, от пешеходного до железнодорожной эстакады, требует тщательного планирования, современных технологий и детальных расчетов. Важно учитывать геологические, экологические и климатические факторы. Процесс строительства длительный, предполагает соблюдение техники безопасности и высокую квалификацию специалистов. Мостостроение отличается выбором специфических материалов и конструктивных решений, а также использованием сложного оборудования и компьютерного моделирования.

Большинство существующих технологий рассчитаны на плановые строительные проекты, но иногда нужны срочные переправы для спасения жизней или быстрой доставки техники. В нестандартных условиях, например в труднодоступных местах без дорог, традиционные методы строительства и доставки оборудования неэффективны.

В таких ситуациях используются самоходные понтонно-мостовые установки и эстакады ИМЖ-500 [1]. Однако они сложны в транспортировке, требуют специализированного оборудования и квалифицированных бригад. Кроме того, ИМЖ-500 содержат множество болтовых соединений [2], что увеличивает время монтажа и риск повреждений при транспортировке.

Актуальность темы обусловлена необходимостью быстрого возведения временных переправ в различных условиях, включая срочные ситуации, стесненные или удаленные условия, где традиционные технологии и оборудование неприменимы или труднодоступны. Следует разработать более простое и быстрое решение для временных переправ, которое можно быстро адаптировать к разным условиям, включая городские застройки и удаленные районы с ограниченной логистикой.

Цель исследования — разработка высокоэффективной технологии монтажа сборно-разборного временного большепролетного строения, позволяющей выполнять монтаж в предельно сжатые сроки, без применения сложного кранового оборудования, в условиях ограниченного пространства, сложного рельефа или экологически уязвимых зон.

Задачи:

- осуществление анализа существующих пролетных строений и основных операций монтажно-демонтажного процесса;
- выбор путем математического моделирования по требуемым параметрам наиболее оптимального конструктивного решения опорного пролета, позволяющего проведение упрощенной ручной или полумеханизированной сборки, снижение веса и высоты конструкции, для обеспечения кратчайших сроков монтажа-демонтажа;
- разработка технологического алгоритма производства работ в заданных условиях с последующим экономическим обоснованием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Каждый мост имеет две основные конструктивные части: опоры и пролетные строения, любое пролетное строение предназначено для передви-

жения по мосту и должно воспринимать заданную нагрузку, передавая ее через опоры на грунты основания. Обустройство различных вариантов опор моста, в свою очередь, делится на концевые устои и промежуточные — быкообразные опоры. Пролет моста измеряется между центрами опорных частей, а полная ширина — между внешними гранями. Существует большое многообразие пролетных конструкций в зависимости от предназначения, условий эксплуатации, требований к воспринимаемой нагрузке, выбор материала для пролетного строения определяется необходимым сроком службы конструкции. Пролетные конструкции включают балочные, ферменные, арочные, рамные, висячие, вантовые и комбинированные решения, сочетающие несколько конструктивных решений, и новейшие разработки, нашедшие применение за рубежом в виде гофрированной вертикальной стенки [3, 4], что дает возможность в некоторой степени увеличить длину пролетного строения.

Монтаж пролетных конструкций моста — это ключевой этап строительства. Выбор метода монтажа определяется множеством факторов: типом моста, условиями местности, доступностью техники, бюджетом и экологическими требованиями. Современные технологии предлагают разнообразные подходы, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения. Перечислим основные методы бескранового монтажа [5–7].

Навесной монтаж — метод возведения мостов с большими пролетами (вантовые, арочные), подходящий для сложных рельефов. Минимизирует применение опор в водоемах, важен для экологии. Секции собирают от опор к центру пролета, используя временные тросы. Требует высокоточного контроля и дорогостоящего оборудования, но позволяет отказаться от промежуточных опор.

Полунавесной метод сочетает элементы навесного монтажа и монтажа с промежуточных опор. Сначала устанавливаются временные опоры, затем производится монтаж части конструкции навесным способом.

Метод надвижки — пролет собирают на берегу, временной площадке или опоре, а затем перемещают на место с помощью домкратов и направляющих. Подходит для больших пролетов или в условиях ограниченного доступа техники. Требует прочных опор и дорогостоящего оборудования, но дает возможность строить без остановки движения под мостом и сокращает сроки на 30 %.

Метод продольной надвижки — пролетная конструкция собирается на одном конце и надвигается на опоры с помощью катков и домкратов. Это ускоряет и удешевляет строительство, снижает риски, улучшает качество сборки на земле, но требует противовеса, выравнивания направляющих и сложных тяговых устройств. Метод не подходит для сложных мостовых пролетов. Частично он применен при строительстве Крымского моста [8, 9].

Монтаж на стапеле с последующей перевозкой — один из передовых методов. Элементы конструкции создаются и собираются в производственных условиях, а затем транспортируются к месту установки. Этот метод позволяет существенно ускорить процесс строительства.

Метод сборки на подмостях — пролет собирается на временных опорах, которые затем демонтируются и заменяются постоянными. Применяется в труднодоступных местах, где невозможно использовать тяжелую технику, например, при строительстве небольших мостов или реставрации исторических сооружений. Преимущества: низкая стоимость, возможность использования местных материалов.

Разновидности сборки на подмостях:

- ярусная сборка — последовательный монтаж от низа к верху с продольными связями;
- секционная сборка — поэтапная установка и соединение панелей для быстрой сборки;
- комбинированная сборка, начальный этап — низовая сборка, затем — монтаж секций с монтажными связями.

Метод использования плавучих кранов или барж — для строительства мостов через реки и водоемы. Секции транспортируются по воде и монтируются с их помощью.

Также стоит упомянуть современные технологии, например, *модульную сборку*, когда элементы изготавливаются на заводах, доставляются на место и собираются как конструктор, что значительно ускоряет процесс и улучшает качество; *магнитолевитационные системы* [10], *использование вертолетов* для монтажа в труднодоступных и горных районах, а также применение *3D-моделирования* из современных материалов и *BIM-технологий* в совершенствовании монтажных процессов [11], что позволяет оптимизировать процессы и избежать ошибок на этапе проектирования.

Традиционные методы, такие как навесной монтаж или надвижка, остаются актуальными, но развитие технологий открывает новые возможности, и все методы монтажа развиваются и адаптируются под новые условия, например с *использованием мостоукладчиков* — современное решение для строительства протяженных мостов. Есть разработки специальных машин-монстров, позволяющих быстро возводить мосты с минимальным количеством стыков на дорожном полотне.

Все методы монтажа мостов применяют модульные системы, гидравлические домкраты, лебедки и роботизированные системы для подъема и установки элементов. Однако они сложны в транспортировке и наладке, требуют тяжелой техники и не могут быть мобильными или одновременно использоваться для демонтажа. Это ограничивает их применение в чрезвычайных ситуациях и удаленных районах.

Второй основной вопрос — это выбор конструктивного решения. Неразрезные балочные пролетные

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

строения, позволяющие равномерно распределить нагрузку, всегда являлись наиболее предпочтительными в мостостроении [12], они значительно легче просчитываются и в программных вариантах, однако логистические и технологические вопросы при возведении данных конструкций не дают возможность их использовать в удаленных, труднодоступных районах, и районах Крайнего Севера или при возникновении ЧС.

В основу разработки были положены требования быстрого монтажа, демонтажа, снижения затрат и отказа от сложного оборудования [13], транспортабельность. Основной материал пролетного строения — *углеводородные композиты* или типа пултрузионных стеклопластиковых [14, 15], обладающие малым весом, устойчивостью к коррозии и высокой прочностью. С учетом заданных параметров для перекрытия средних пролетов 36 м [16], чтобы не проводить расчет на аэродинамическую устойчивость, были выбраны два наиболее часто встречающихся варианта конструктивного решения с максимальным набором повторяющихся элементов, что позволяет значительно облегчить условия транспортировки, упростить процесс сборки через унификацию конструкции и достигнуть многократного применения — перекрестно-балочная и перекрестно-стержневая конструкции с балками замкнутого сечения, когда основные балки являются лонжеронами, а поперечные — шпангоутами. Ширина моста составляет 9 м, что соответствует двухполосной дороге общего пользования[1], с учетом обочин и пешеходных проходов, как оптимальному решению с технической и экономической точки зрения. Конструкция предназначена для многократного использования, упрощенной сборки и монтажа без тяжелой техники. Она включает облегченные секции, шарнирные соединения и внутренние торсионы, что снижает транспортные размеры, упрощает логистику и сборку на стройплощадке, а также уменьшает высоту пролетной конструкции. Расчеты выполнены для двух решений с одинаковыми размерами 9 × × 36 × 3 м, высота соответствует 1/8–1/12 от длинны пролета СП 35.13330.2011[2]. Лонжероны составные, должны отличаться большей жесткостью. Первая перекрестно-стержневая сетчатая пространственная конструкция состоит из горизонтальных труб, шарнирно соединяемых наклонными стержневыми подкосами, образующими в пространстве ячеистую структуру с верхним и нижним элементами в виде сетки, состоящей из квадратов (рис. 1) [17, 18], вторая перекрестно-балочная конструкция — основные балки выполнены из *швелеров*, доборные элементы — вставки из прямоугольных труб, подкосы из прямоугольных труб[3] (рис. 2). Сборка-разборка и транспортировка конструкций просты и быстры. Заводское изготовление повышает надежность. Конструкция выдерживает нагрузку до 20 т, рассчитанную на проезд груженых самосвалов и тяжелой техники.

Установка дополнительных поперечных решетчатых вставок *4* во второй конструкции может

[1] ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293836/4293836215.pdf

[2] СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293811/4293811024.pdf

[3] Патент RU № 2814086 C1. Сборно-разборное пролетное строение / *Юдина А.Ф., Розанцева Н.В.*; заявл. № 2023114396 от 31.05.2023. Опубл. 21.02.2024.

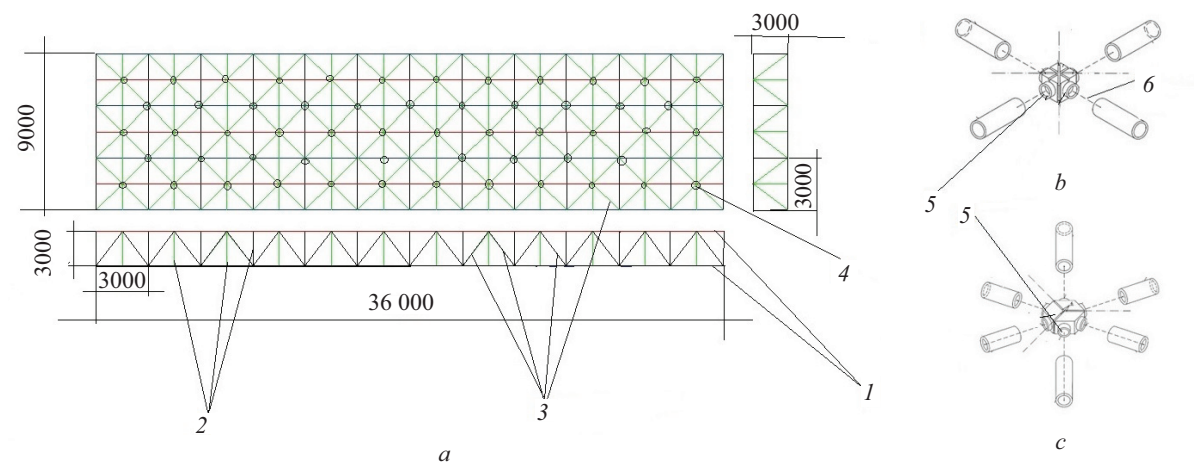


Рис. 1. Перекрестно-стержневая конструкция: *1* — пролетные конструкции из круглых труб 510 × 10 мм; *2* — трубы стойки, круглые 325(273) × 10 мм; *3* — подкосы, круглые трубы 325(273) × 10 мм; *4* — узловое соединение (*b*, *c* — варианты узловых соединений); *5* — входные отверстия с винтовой системой; *6* — торсионное соединение

Fig. 1. Cross-rod structure: *1* — span structures made of round pipes 510 × 10 mm; *2* — rack pipes, round 325(273) × 10 mm; *3* — struts, round pipes 325(273) × 10 mm; *4* — nodal connection (*b*, *c* — variants of nodal connections); *5* — inlet openings with screw system; *6* — torsion joint

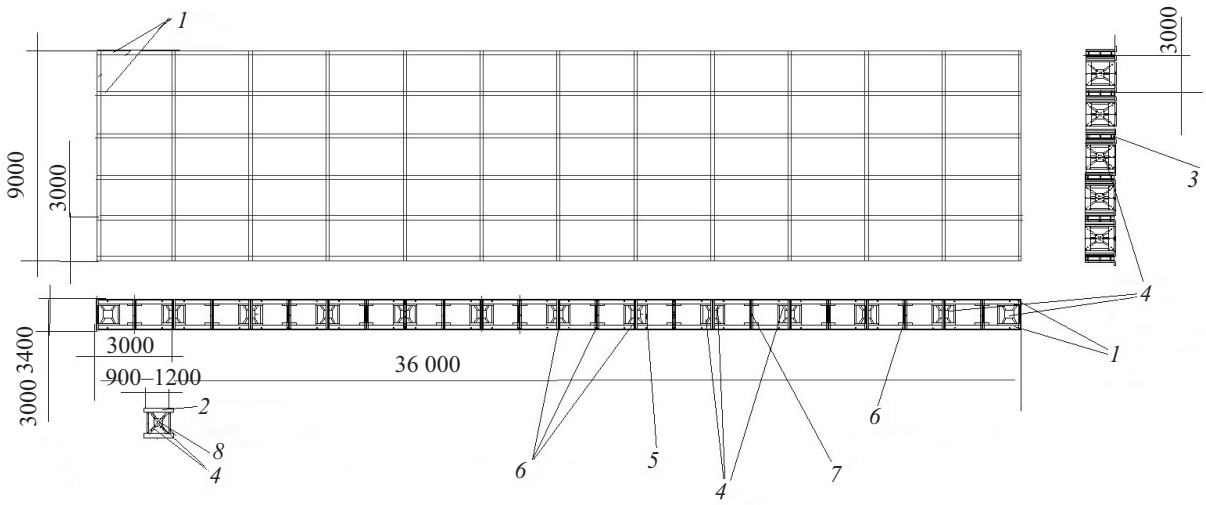


Рис. 2. Перекрестно-балочная конструкция: *1* — пролетная балка (швеллер 400–500 мм); *2* — швеллер на размер меньше основного, чтобы плотно входить в основную конструкцию; *3* — стойка балок лонжеронов, вид сбоку; *4* — вставной элемент усиления из двух перекрещенных подкосов, квадратных труб, сверху на сварную часть которых приварена пластина; *5* — стойки квадратные 150 × 150 × 8; *6* — накладной элемент усиления, устанавливаемый с двух сторон; *7* — стойка складная; *8* — металлическая пластина толщиной около 1 см

Fig. 2. Cross-girder structure: *1* — span beam (channel 400–500 mm); *2* — channel is one size smaller than the main one in order to fit snugly into the main structure; *3* — stand of spar beams, side view; *4* — insert reinforcement element from two crossed struts, square pipes, on top of the welded of which a plate is welded; *5* — square racks 150 × 150 × 8; *6* — overhead reinforcement element installed on both sides; *7* — folding rack; *8* — metal plate about 1 cm thick

быть стандартной или разреженной. Регулируемые по длине пролетные соединения ускоряют монтаж. Грузоподъемность перекрестно-балочной конструкции варьируемая: рассчитанная на пропуск пешеходов или тяжелый транспорт. С целью усиления между балками устанавливают перекрестные связи с талрепами. Сборка проста благодаря унифицированным элементам, симметричным относительно своих осей.

Для возможности самотранспортировки наплывным способом дополнительно разработан внешний корпус — многослойное полотнище из композитного материала, которое можно трансформировать из плоского в объемное (рис. 3). Проезжая часть состоит из сборно-разборного ортотропного покрытия (рис. 4) с рифленой поверхностью[4], закрепляемого перилами высотой не менее 1,1 м. Внешний корпус при временных установках можно не снимать, а для длительного использования его демонтируют. Комплексное предлагаемое решение повышает безопасность пешеходов, предотвращает смещение транспорта, увеличивает несущую способность и сцепление колес, снижая скольжение. Это важно для самотранспортируемых сплавных средств.

Разработанная технология предполагает монтаж системы:

- с использованием сборно-разборных опорных столбов типа МИК-С[5] [19] или системы PERI в случае отсутствия несущих опор (рис. 5);
- на подготовленное заранее или существующее основание (рис. 6).

Опорные столбы *19* состоят из рядовых рам с диагональными связями *20*, которые могут быть снабжены проходными настилами. Рамы соединяются фиксаторами-шпинделями *25*. Столб опирается на нижние стопы и завершается опорными головками для монтажа лебедок *6*. Для обеспечения устойчивости при высоких нагрузках предусмотрена дополнительная горизонтальная опора с перфорацией *22*, по которой движется каретка *24* подкосной системы *23*, позволяя плавно отодвигать систему для монтажа и настройки. Каретка надежно фиксируется в любом положении без вспомогательных устройств или на шпиндель.

При основном способе монтажа в готовое основание с заранее определенным шагом заделываются анкерные крепления, закрепляемые особыми клеями и соединяемые анкерным башмаком, на который будет монтироваться опорное гнездо для удержания направляющих рельсов.

[4] *Николенко Д.А., Шрейнер В.С., Кузнецов В.О., Евагян Г.В.* Проектирование металлических мостов с ортотропной плитой проезжей части : учебное пособие. Ростов-н/Д : ДГТУ, 2023. 31 с.

[5] Мостовые инвентарные конструкции стоечные МИК-С. URL: https://vzcons.ru/miks/

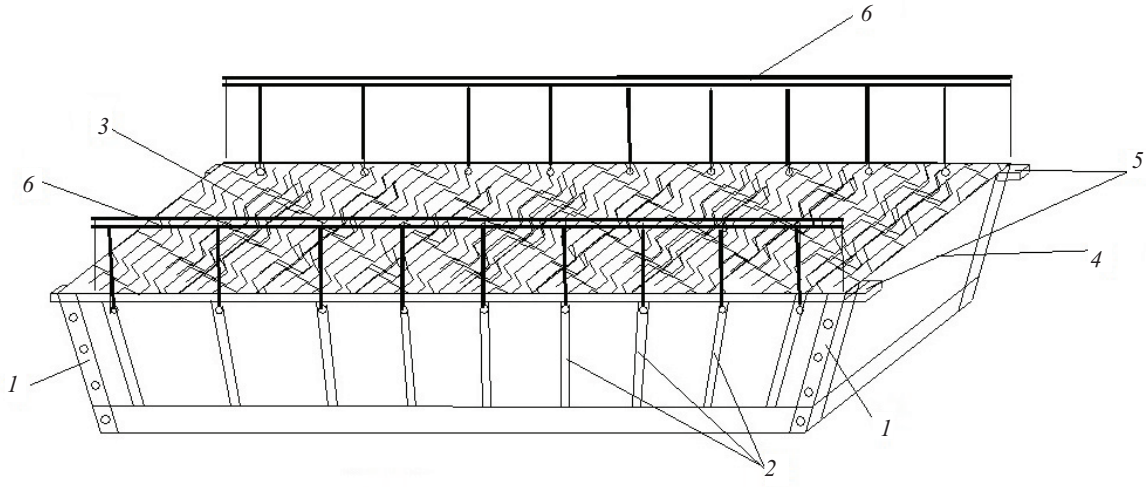


Рис. 3. Полносборный корпус из композитного материала с установленным ортотропным покрытием и перилами: *1* — боковой специальный клапан, сшивочный элемент внешнего корпуса с отверстиями, позволяющий дополнительно жестко стянуть корпус; *2* — специальные каналы, позволяющие после полной сборки установить в них ограждающее устройство с перилами; *3* — ортотропный элемент покрытия; *4* — полностью собранный внешний корпус; *5* — проушинное устройство для возможного соединения нескольких пролетов при устройстве понтонной переправы, или при транспортировке пролета к месту монтажа; *6* — внешнее ограждение с перилами

Fig. 3. Fully assembled composite housing with an orthotropic coating and handrails installed: *1* — special side valve, stitching element of the outer casing, with holes, allowing additional rigid tightening of the casing; *2* — special channels allowing, after complete assembly, to install an enclosing device with handrails in them; *3* — orthotropic coating element; *4* — fully assembled external body; *5* — eyelet device for the possible connection of several spans when installing a pontoon ferry, or when transporting the span to the installation site; *6* — external fence with handrails

Опорные гнезда монтируются с шагом, позволяющим закрепить направляющие рельсы *2* не менее чем по двум точкам для подъема корпуса подъемной опорной домкратной рамы *11* и вторую рельсовую систему для передвижения подъемника с домкратной системой *10*, закрепляемую также по двум точкам по длине рельса. Рельсовая система монтируется снизу вверх, состоит из нескольких секций, соединенных вертикальными концами, что дает возможность создать конструкцию нужной высоты, и выравнивается отвесом или лазером. Анкеры *3* при съеме системы не извлекаемые и остаются в основании навсегда. В данном случае может быть применено стопорное контролирующее устройство с гидравлическим домкратным подъемником системы PERI типа RCS, имеющее на каретках откидные лапки и стопорный элемент, соединяющийся сквозь перфорацию навесного направляющего рельса, что страхует навесную часть от возможного скольжения и позволяет снимать/навешивать направляющие с боку, что облегчает первое навешивание, и отпадает необходимость пропускать рельсы первых *2* и вторых направляющих через опорные гнезда при навешивании.

Установка грузонесущего узла:

• на верхнюю полку системы устанавливаются лебедки с барабанами, блоки уравнительного устройства и два каната *8*, намотанных каждый на отдельный барабан *7* для каждого из канатов *8*;

• канаты наматываются на барабаны, блоки расположены по противоположным сторонам рамы.

Корпус подъемной опорной домкратной рамы *11* включает верхнюю и нижнюю последовательно соединенные опоры, верхнее устройство снабжено несущими крюками и опорным блоком для подъема рамы с грузом, в том числе и с помощью вертикального гидравлического цилиндра *10*; нижнее устройство — опора *15* для удержания и подъема крупногабаритного груза *18* содержит *не менее двух*

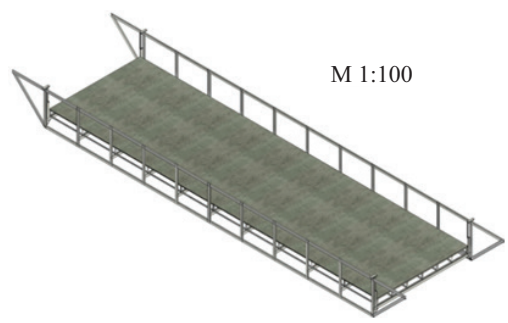


Рис. 4. Вид ортотропного покрытия с перилами в масштабных размерах

Fig. 4. View of the orthotropic covering with handrails in large-scale dimensions

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

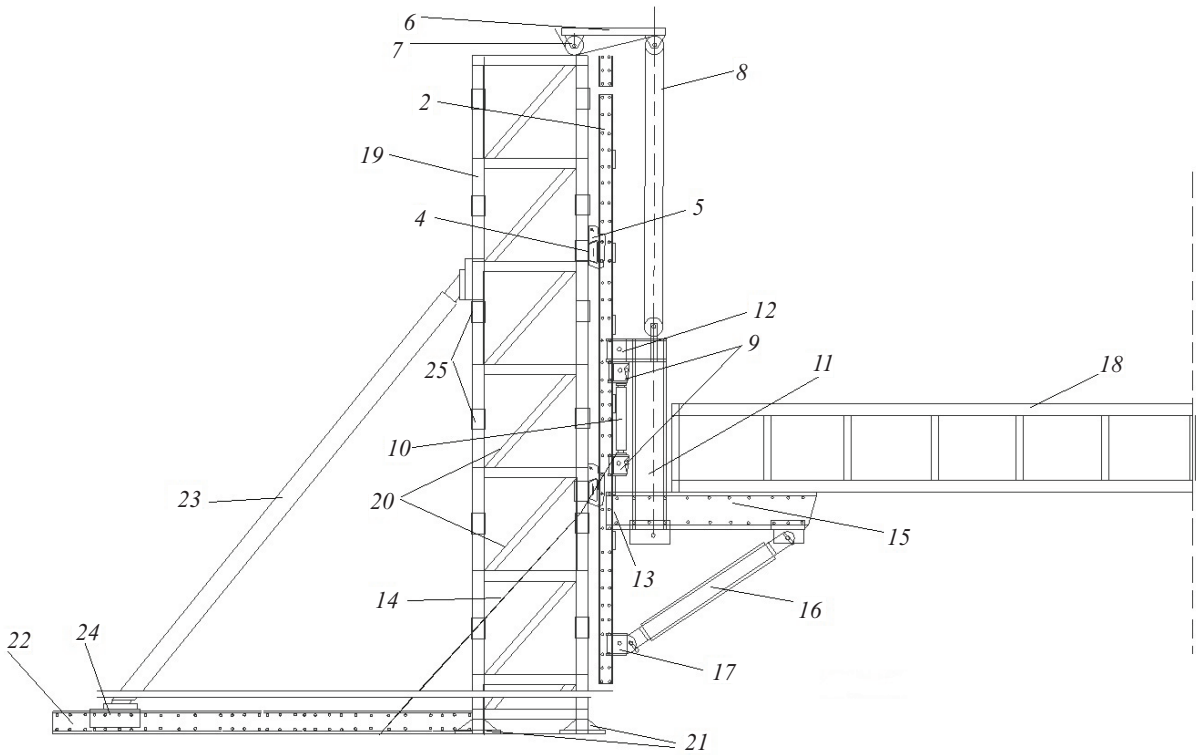


Рис. 5. Вид сбоку, подъем конструкции с установкой опорных колонн: *2* — направляющий рельс; *4* — несущая часть подъемного устройства; *5* — опорное гнездо; *6* — лебедочная система; *7* — барабан лебедки; *8* — лебедочный трос; *9* — стопорное контролирующее устройство; *10* — домкратная система; *11* — рама; *12* — верхняя каретка; *13* — нижняя подъемная каретка; *14* — система тросов с двигателем; *15* — опора подъемной рамы; *16* — подкос; *17* — направляющая каретка подкоса; *18* — поднимаемая конструкция; *19* — опорная башня; *20* — подкосы; *21* — опорные стопы; *22* — горизонтальная опора; *23* — подкос опоры; *24* — каретка опоры; *25* — фиксаторы

Fig. 5. Side view, lifting of the structure with the installation of support columns: *2* — guide rail; *4* — bearing part of the lifting device; *5* — support socket; *6* —winch system; *7* — winch drum; *8* — winch cable; *9* — locking control device; *10* — jack system; *11* — frame; *12* — upper carriage; *13* — lower lifting carriage; *14* — cable system with motor; *15* — lifting frame support; *16* — footrest; *17* —guide carriage of the strut; *18* — lifting structure; *19* — support tower; *20* — struts; *21* — support feet; *22* — horizontal support; *23* — support slope; *24* — support carriage; *25* — clamps

подкосов с гидравлическими стержнями *16* и шарнирным закреплением одним концом к подъемной раме, а другим — к рельсовой конструкции на скользящей по внешним направляющим кареткой *17*. Корпус подъемной опорной домкратной рамы *11* имеет жесткую сварную конструкцию и рассчитывается на восприятие всех нагрузок, воспринимаемых от опираемых на них поднимаемых конструкций *18*. Подъемный модуль интегрируется с корпусом подъемной рамы, устанавливается на рельсовую систему и скользит по ней в процессе подъема. Привод подъемника включает домкратные поршни, механизмы контроля горизонтальности и стопорные устройства, предотвращающие обратный ход.

Монтаж подъемного модуля:

• привод, включающий в себя подъемный механизм — один или более линейных домкратных поршней *10*, соединенных последовательно между собой, устанавливается на подъемную раму, соединяется с рельсами;

• подъем осуществляется первоначальным толчковым движением лебедочной системы и путем последовательного выдвижения поршней;

• опорные каретки зацепляются в точках вдоль боковых сторон и/или краев подъемных рельсов.

Чаще всего применяются двухпоршневые системы *10* с возможностью выдвижения и втягивания вдоль опорного рельса и перемещения корпуса подъемной опорной домкратной рамы *11*. Параллельные балки двух параллельных домкратных систем *10* поднимаются параллельно и последовательно. Такое решение обеспечивает не только надежное крепление во время всего процесса подъема/опускания, обладает высокой несущей способностью и позволяет преодолевать неровности и возможные выступы на основании *1* с уклоном до ±4 ° или смещение стены основания до 15–20 см на расстоянии по высоте от трех метров. Для анкеровки на круглых стенах может применяться поворотный элемент анкерной части башмака *4* с диапазоном угла поворота ±15 °.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

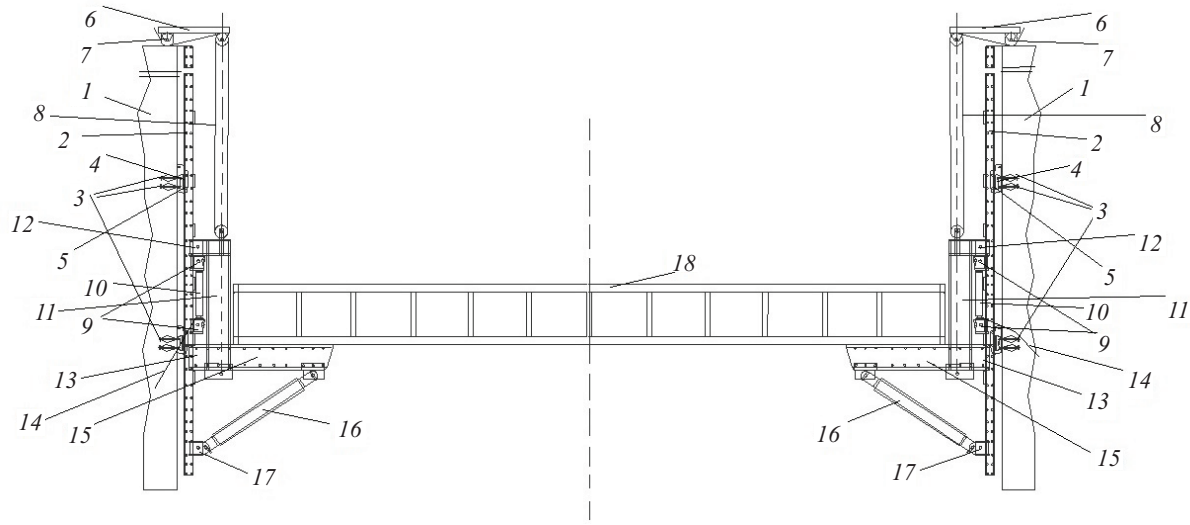


Рис. 6. Вид сбоку, подъем конструкции: *1* — основание; *2* — направляющий рельс; *3* — элемент крепления к основанию; *4* — несущая часть подъемного устройства; *5* — опорное гнездо; *6* — лебедочная система; *7* — барабан лебедки; *8* — лебедочный трос; *9* — стопорное контролирующее устройство (верхнее и нижнее); *10* — домкратная система; *11* — рама; *12* — верхняя фиксирующая каретка; *13* — нижняя фиксирующая подъемная каретка; *14* — система тросов, подсоединенная к двигателю; *15* — консольная опора подъемной домкратной рамы; *16* — подкос с гидравлическим стержнем; *17* — направляющая каретка подкоса; *18* — поднимаемая конструкция

Fig. 6. Side view of the lifting structure: *1* — base; *2* — guide rail; *3* — mounting element to the base; *4* — bearing part of the lifting device; *5* — support socket; *6* — winch system; *7* — winch drum; *8* — winch cable; *9* — locking control device(upper and lower); *10* — jack system; *11* — frame; *12* — upper locking carriage; *13* — lower locking lifting carriage; *14* — cable system connected to the engine; *15* — cantilever support of the lifting jack frame; *16* — support with hydraulic rod; *17* — guide carriage of the strut; *18* — lifting structure

Во втором случае рельсы крепятся к опорному столбу с помощью автоматических фиксаторов.

Завершение монтажа:

• поднимаемый элемент закрепляется на раме;

• корпус рамы поднимается и перемещается по рельсам с помощью лебедок и домкратов;

• система готова к эксплуатации после достижения проектной высоты.

Преимущества предлагаемой технологии:

• универсальность и компактность: подходит для различных типов оснований, из-за компактных размеров может быть смонтирована в любых стесненных условиях, позволяет полносборный подъем любых конструкций сложной конфигурации, имеющих хотя бы две противоположные стороны;

• надежность: система имеет автоматическое управление, анкерная фиксация и стопорные устройства предотвращают падение;

• простота монтажа: легкие элементы и возможность быстрой сборки, не требуется длительная настройка рабочей системы;

• подъемники приводятся в действие одновременно, при этом нагрузка может быть распределена между всеми подъемниками.

Высокая грузоподъемность дает возможность не только подъема грузов и конструктивных элементов с уровня земли или с уровня поверхности воды, но и спуска крупных конструкций с проектной отметки на уровень земли или транспортного средства, что позволяет ее применение как при строительстве, так и при реконструкции и демонтаже объекта, способствуя значительному ускорению производства работ, и не требует использования кранового оборудования, для возможности последующего демонтажа пролетной конструкции устройство может оставаться на опорах моста. Технология также не требует необходимости применения плавучих средств. *Все элементы конструкции к месту монтажа поставляются в сложенном виде. В случае необходимости длина сборной конструкции может регулироваться в зависимости от необходимой длины пролета путем отсоединения части элементов, снятием с торсионного соединения.*

Для определения грузоподъемности подъемного устройства необходимо было выбрать более надежную конструкцию. Провели сбор нагрузок и расчеты для перекрестно-балочной и перекрестно-стержневой систем, чтобы уточнить сечения, высоту и вес, а также возможность их оптимизации[6]. Расчеты выполнялись в программе SCAD++ с учетом ГОСТ 27751–2014[7] и стадии эксплуатации, с импортом расчетных схем из программы Revit.

[6] *Саламахин П.М.* Проектирование мостовых и строительных конструкций : учебное пособие. М. : КноРус, 2013. 410 с.

[7] ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115736

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

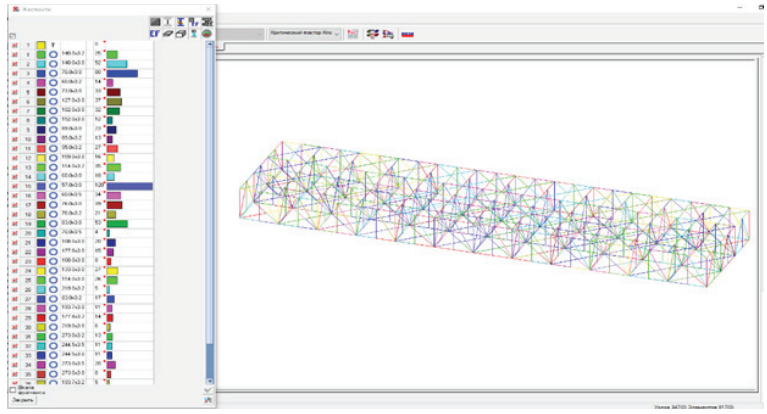


Рис. 7. Предлагаемые варианты сечений перекрестно-стержневой конструкции

Fig. 7. Proposed cross-section options for the cross-rod structure

Расчеты учитывали постоянные, временные и прочие нагрузки, включая вертикальные от большегрузной техники. Влияние возможных осадок грунта и техногенных ситуаций не учитывалось. Сравнивались районы с высокой вероятностью природных ЧС[8] и сложными логистическими условиями, включая Республику Саха (Якутия), Чукотский автономный округ, удаленные районы Красноярского края и Магаданской области. За основу климатических данных выбран регион с самым слабым транспортным обеспечением — Среднеколымский улус.

Нагрузка от собственного веса принята равномерно распределенной с коэффициентом надежности γ_f = 1,15 [20]. Узлы рассчитаны как шарнирные для сборно-разборных конструкций. Высота конструкций изменялась до достижения критического состояния, чтобы избежать прогибов выше допустимых, но не менее 1:15 от длины. Максимальная высота не должна превышать 2000–2100 мм для транспортировки и складывания. Расчет произведен на металлическую конструкцию. Изначально после введения параметров система предложила большой разброс требуемых сечений конструктивных элементов, что не устраивало по вопросу унификации (рис. 7).

Были скорректированы размеры. В результате расчетов были получены расчетные усилия и перемещения от нагрузок по оси *Z*, мм.

Перекрестно-стержневая конструкция (рис. 8) показала наихудшие результаты при заданной нагрузке, даже при максимальных сечениях, которые не позволяют производить монтаж не только вручную, но и средствами малой механизации, и высоте конструкции 30 00 мм, прогиб составил 67 мм, что значительно больше максимально допустимого f_u = 49 мм (рис. 9). Получается, что в итоге сильно ломается центральная часть моста, и там скорее всего без опоры не обойтись.

Перекрестно-балочная система позволила снизить высоту конструкции пролетного строения до требуемой 2,1 м и уменьшить сечение (рис. 10).

Выбран швеллер 40П ст. 3, вес погонного метра — 48,3 кг.

[8] Mchs.gov.ru. Глава 4. Прогноз возникновения чрезвычайных ситуаций на 2025 год. URL: https://mchs.gov.ru/uploads/document/2025-05-30/35fc145f9049442d38ef4274106cc0ab.pdf

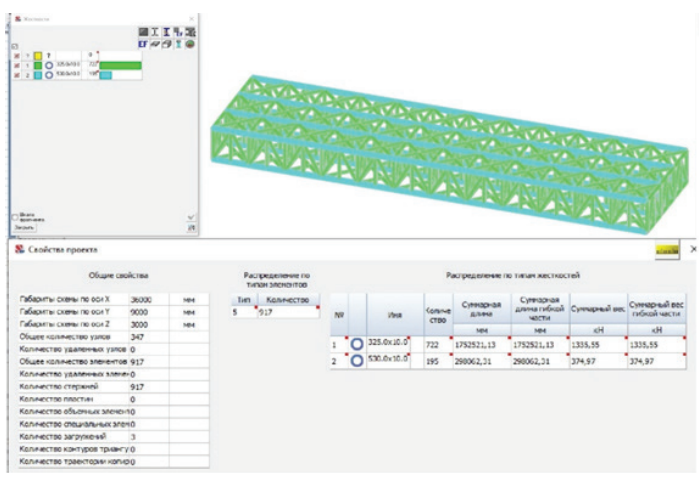


Рис. 8. Расчетная схема перекрестно-стержневой конструкции

Fig. 8. Calculation scheme of the cross-rod structure

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

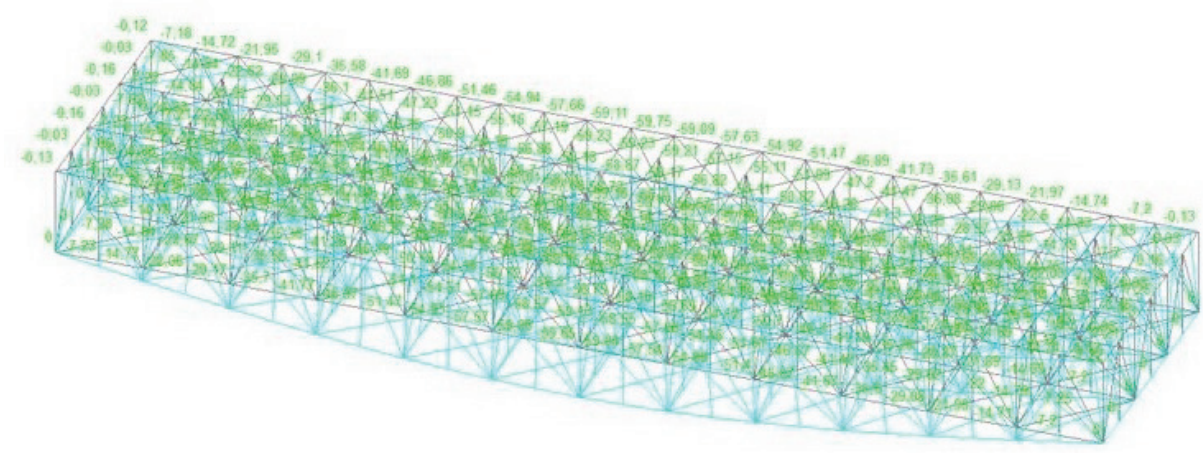


Рис. 9. Карта распределения усилий от изгибающих моментов в перекрестно-стержневой конструкции

Fig. 9. Force distribution map from bending moments in a cross-bar structure

В данном случае максимальное перемещение составило 47 мм (рис. 11), что меньше максимально допустимого $f_u = 49$ мм в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»[9].

В этом случае требуется учесть и тот фактор, что ортотропные плиты покрытия проезжей/проходной части проектируемого пролетного строения включаются в работу и способны значительно снизить возникающие напряжения и повысить несущую способность перекрестно-балочной конструкции [21].

В виде основного подъемного механизма выбран гидравлический домкрат как обладающий максимальной грузоподъемностью и надежностью. В качестве грузовой нагрузки приняты показатели перекрестно-балочной конструкции. Расчетный вес углекомпозитной конструкции такого типа составляет примерно не более 1/5 от аналогичного сталь-

[9] СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. URL: https://docs.cntd.ru/document/456044318

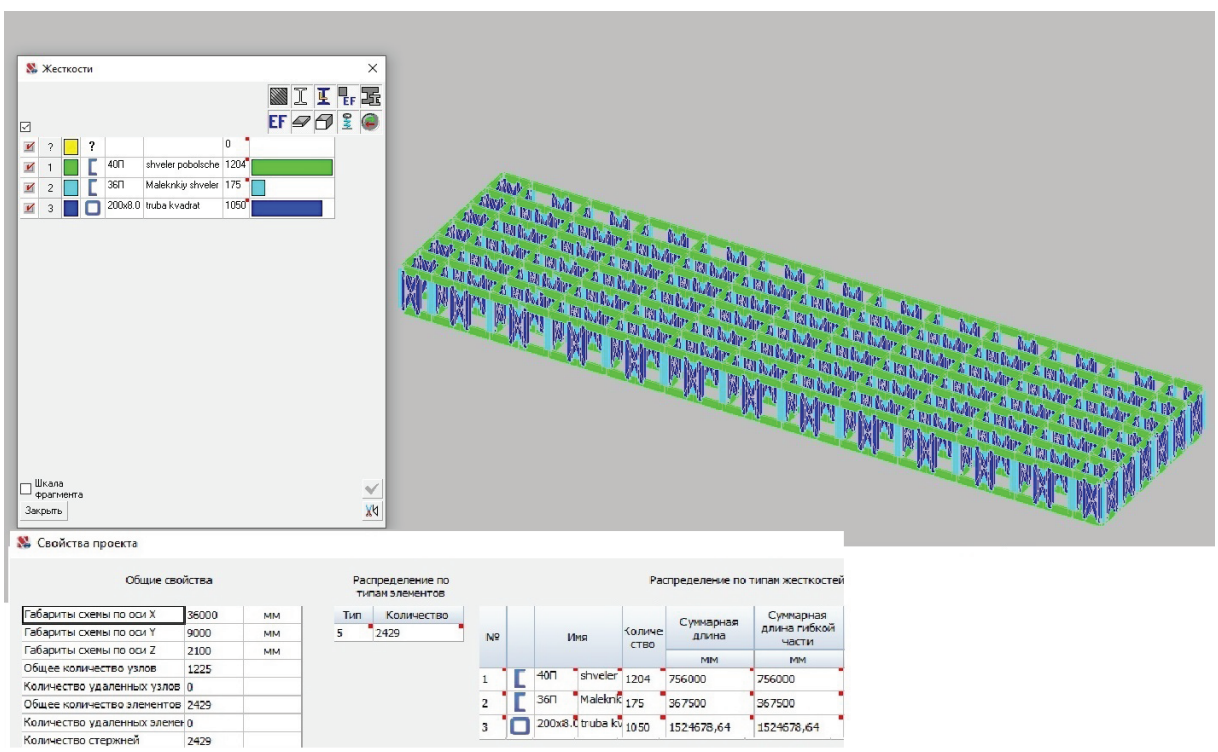


Рис. 10. Расчетная схема перекрестно-балочной конструкции, позволившая максимальное снижение высоты и сечения конструкции

Fig. 10. The design scheme of the cross-girder structure, which allowed for maximum reduction in height and cross-section of the structure

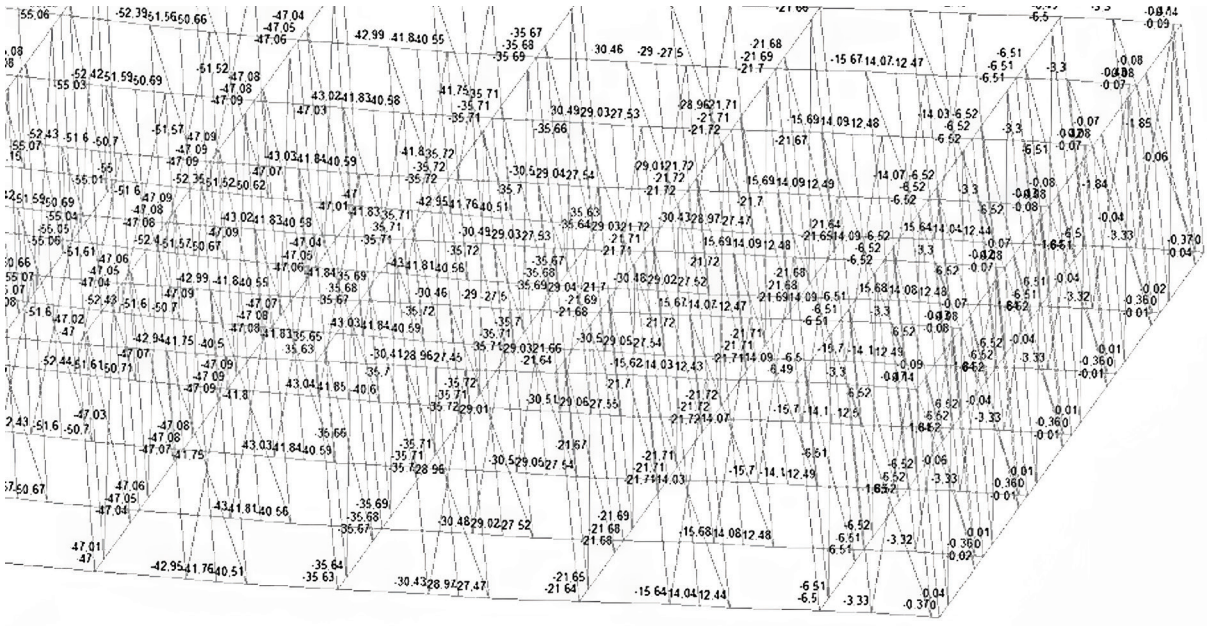


Рис. 11. Карта распределения усилий от изгибающих моментов в перекрестно-балочной конструкции

Fig. 11. Force distribution map from bending moments in a cross-beam structure

ного сооружения. Расчетный вес разработанной конструкции при выполнении из стали составит 59 т, суммарный вес перекрестно-балочной углеводородной конструкции — 11,8 т. Приведенная оценка является приблизительной и может варьироваться в зависимости от конкретного проекта, требований к конструкции и точности расчета, поэтому в расчете гидроцилиндра учтем усредненный вес поднимаемой конструкции как 20 т из-за неточности расчета, не учитывающего вес внутренних торсионных связей, внешних связей, внешнего корпуса и ортотропного покрытия проезжей части. Каждый подъемник содержит по два цилиндра, будем считать что конструкция закреплена по крайним точкам с двух противоположных сторон, т.е. одновременно работают 8 домкратных поршней, для равномерности и одинаковой скорости подъема в каждой точке, система оснащена компонентами контроля и синхронизации. Желательная скорость подъема: 0,008 м/мин.

Расчет усилия на один домкрат[10]*:*

• общее усилие для подъема груза: $F_{общ} = 20 \times 9{,}81 = 196{,}2$ кН;

• усилие на один домкрат: $F_1 = 196{,}2/8 = 24{,}525$ кН.

Расчет диаметра поршня:

формула для расчета: $D = 4F/\pi p$,

где F — усилие на поршень (24,525 кН); p — допустимое давление (принимаем 3,62 МПа).

Подставляем значения:

$D = (4 \cdot 24\,525)/(3{,}14 \cdot 3{,}62 \cdot 10^6) = 0{,}112$ м = 112 мм.

Проверочные расчеты:

• площадь поршня: $S = \pi \cdot (D^2/4) = 3{,}14 \times (0{,}112^2/4) = 0{,}00985$ м^2;

• усилие, развиваемое поршнем: $F = p \cdot S = 3{,}62 \cdot 10^6 \cdot 0{,}00985 = 35{,}6$ кН;

• запас по усилию: 35,6/24,525 = 1,45 > 20–30 % (решение обладает достаточным запасом и безопасностью).

Данное технологическое решение является вполне осуществимым с учетом дополнительного лебедочного усилия, может иметь хороший запас прочности, надежности и грузоподъемности и безопасность эксплуатации, конструкция поршней может быть размещена на подъемной раме, так как ее размеры соответствуют ранее предполагаемым.

Рекомендации по конструкции: диаметр поршня — 112 мм; рабочее давление — 3,62 МПа; усилие на поршень — 24,525 кН; скорость подъема — 0,008 м/мин; время подъема — около 20 мин.

Необходимые поправки: следует предусмотреть систему управления синхронностью работы домкратов; требуется установка предохранительных клапанов, рекомендуется использовать масло с высокой вязкостью; предусмотреть систему смазки и защиты от попадания грязи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен анализ существующих технологий бескранового монтажа мостовых пролетов с учетом их достоинств и недостатков. В процессе исследования была разработана технология подъема/опускания, основанная на совместном действии синхронизированных гидравлических домкратов и лебедочных механизмов, передвигающих подъем-

[10] *Лачуга Ю.Ф., Ксендзов В.А.* Теоретическая механика : учебное пособие для вузов. М. : КолосС, 2005. 576 с.

ную раму с секцией моста по рельсовым направляющим, включая поэтапное планирование работ. Технология позволяет поднимать/опускать конструкцию с уровня земли или поверхности воды, предполагается наличие компьютерного управления для точного перемещения элементов. Технология легко адаптируется к различным типам мостовых металлических конструкций как для пешеходных, так и автомобильных мостов, включая аварийное восстановление разрушенных конструкций, дает возможность ее реализации в ранее недоступных локациях, включая возможность возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций в центрах городской застройки, позволяя монтировать пролеты до 50 м без применения кранов. Первоначальное внедрение технологии не должно потребовать больших капитальных вложений, поскольку она основана на ранее разработанных и широко применяемых элементах как опорных стоек, так и подъемной системы. Экономический эффект от внедрения может быть достигнут: за счет сокращения сроков строительства на 15–25 %, благодаря более простому запуску системы и автоматизации, повышающих производительность труда и снижающих продолжительность выполнения работ; улучшению качества монтажа путем высокой точности и контроля процесса и, как следствие, снижению стоимости монтажа на 20–30 %, в том числе за счет отказа от аренды дорогой спецтехники.

Произведено моделирование двух конструкций временных сборно-разборных пролетов — перекрестно-балочной и перекрестно-стержневой, из композитных материалов (например, пултрузионных стеклопластиковых), позволяющих снизить вес конструкции без потери прочности материала, адаптированных для упрощенной ручной или полумеханизированной сборки за счет разработки соединительных узлов, обеспечивающих точную стыковку элементов без использования кранов. Проведен расчет нагрузок на все компоненты системы и компьютерное трехмерное моделирование работы конструкций в процессе эксплуатации в программе SCAD++, анализ устойчивости конструкций выявил возможные деформации с расчетом траекторий перемещения элементов под действием нагрузки, что позволило выбрать как более оптимальную перекрестно-балочную конструкцию. Разработанный внешний чехол дает возможность самотранспортировки, как понтона, или самонадвижку конструкции пролета к месту монтажа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство мостов — планомерный, тщательно проработанный процесс с четкими требованиями и стандартами, тогда как строительство в нестандартных ситуациях требует гибкости, оперативности и готовности к принятию нестандартных решений в условиях ограниченных ресурсов и времени. Разработка комплексной технологии бескранового монтажа мостовых пролетов является перспективным направлением развития отрасли и альтернативой традиционным методам. Выполнены расчеты нагрузок на все составляющие системы, подтвердившие возможность ее внедрения.

Научная новизна разработанной технологии заключается в комплексном подходе к монтажу строительных конструкций, который характеризуется следующими ключевыми особенностями: возможность монтажа крупных элементов целиком, экономическая эффективность, достигаемая за счет минимизации транспортных расходов, ускорения сроков строительства посредством оптимизации процессов сборки и установки элементов, сокращения времени на подготовительные работы, быстрого развертывания, возможности использования инвентарных средств многократного применения, уникальной возможности использования мостового пролета как временной самосплавляемой конструкции. Такой комплексный подход позволяет значительно расширить возможности работы в сложных условиях и труднодоступных районах, повысить эффективность строительных работ, в том числе за счет высокой универсальности, обеспечивающей лучшую адаптивность и устойчивость технологии.

Ключевыми элементами технологии выступают модульная сборка, сочетание гидравлических и лебедочных систем, и цифровое моделирование. Для возможности массового внедрения технологии и точности изготовления необходимы более точные расчеты всех компонентов модульной системы от лебедочно-поршневых систем с учетом их ограничения по грузоподъемности до доработки рабочих чертежей, обучения работников и непосредственных первоначальных инвестиций в новое оборудование. Дальнейшие разработки будут направлены на решение этих вопросов, а также на нормативное регулирование.

Преимущества технологии перевешивают потенциальные трудности, технология бескранового монтажа открывает новые перспективы для мостостроения, технология будет востребована в лесозаготовительной и иной промысловой деятельности, там, где осложнена доставка и монтаж стандартных мостовых конструкций и кранового оборудования, где необходим быстрый монтаж, и при этом срок постоянной эксплуатации невелик, а также при передвижениях транспортных колонн в труднодоступных регионах.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Юферов С.* Под Ярославлем испытали новый железнодорожный мост-эстакаду ИМЖ-500 // Военное обозрение. Инженерные войска и транспорт. 2013. URL: https://topwar.ru/32648-pod-yaroslavlem-ispytali-novyy-zheleznodorozhnyy-most-estakadu-imzh-500.html

2. *Заец А.А.* Пути развития и совершенствования конструктивного исполнения мостовых конструкций для выполнения железнодорожными войсками задач по штатному предназначению // Теория и практика восстановления искусственных сооружений на железных дорогах : сб. науч. тр. по мат. отраслевой науч.-практ. конф. 2023. С. 17–21. EDN EXJADY.

3. *Лукин А.О., Суворов А.А.* Пролетные строения мостов с гофрированными металлическими стенками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2 (41). С. 45–67. EDN VPWHPT.

4. *Полтораднев А.С.* Вариация прочности отсеков при проектировании балок с плоской и гофрированной тонкой стенкой // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 4 (33). С. 174–178. EDN PVGQNN.

5. *Ходяков В.А., Пастушков В.Г.* Высокие технологии в проектировании и строительстве мостов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 3. С. 432–439. EDN QCVHGR.

6. *Иванов И.А.* Дороги мира. История и современность : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2017. 282 с. EDN ZVACLP.

7. *Smith J.* Crane-Free Bridge Construction: Methods and Case Studies. Springer. 2019.

8. *Каньшин Е.* Строительство мостов по технологии цикличной продольной надвижки (ЦПН). Опыт Германии // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 33. С. 106–110. EDN STRDYN.

9. *Адучин Д.А., Русняк В.И., Тышкевич Е.Н.* Обзор проектных решений, применяемых при строительстве Крымского моста // Университетская наука. 2018. № 1 (5). С. 15–17. EDN URNXOP.

10. *Талашкин Г.Н.* Особенности проектирования и строительства искусственных сооружений для Маглев-дорог // Транспортные системы и технологии. 2016. Т. 2. № 4. С. 35–59. EDN XGVSWT.

11. *Паторняк А.В., Краева В.А.* Опыт применения специализированных программ для информационного моделирования мостов // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : сб. мат. XIX Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 159–167. EDN LTLGNH.

12. *Макаров А.В., Калиновский С.А.* Унификация в проектировании четырехпролетных неразрезных мостов // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 120–126. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-120-126. EDN COIIEV.

13. *Юдина А.Ф., Евтюков С.А., Розанцева Н.В.* Разработка технологии монтажа пространственной конструкции на основании экспериментально-теоретических исследований перекрестно-балочной системы // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 102–107. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-102-107. EDN NALSAY.

14. *Иванов А.Н.* Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (54). С. 29–37. EDN NMZLHC.

15. *Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р., Киселев С.С.* Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 12. С. 1883–1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895

16. *Квитко А.В., Орехов А.В., Петров К.В.* Научно-экспериментальное обоснование оптимальных параметров балок пролетных строений военных железнодорожных мостов из композитных материалов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 48–52. EDN KQOTHL.

17. *Мельников Р.В.* Перекрестно-стержневые (структурные) конструкции покрытий, методы их возведения и варианты опирания // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : сб. докл. 2023. С. 188–194. EDN FWULAG.

18. *Потасьев С.С.* Конструкции структурных покрытий в отечественной практике проектирования и способы их монтажа // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 7. С. 1079–1090. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1079-1090. EDN OHWZLG.

19. *Должиков В.Н., Должикова Е.Н.* Экспериментальные исследования влияния деформаций в узловых соединениях на напряженно-деформированное состояние в натурной опоре из МИК-С // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1484–1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493. EDN AISYTD.

20. *Надольский В.В.* Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 10. С. 1606–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616. EDN UIGFWY.

21. *Коргин А.В., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З.* Включение ортотропных плит настила в работу несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 882–896. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896. EDN LRMBFI.

Поступила в редакцию 9 июня 2025 г.
Принята в доработанном виде 29 сентября 2025 г.
Одобрена для публикации 30 сентября 2025 г.

Об авторе: **Надежда Владимировна Розанцева** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7138-7182, РИНЦ ID: 870835, Scopus: 57205443634, ORCID: 0009-0008-1341-4743; nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

REFERENCES

1. Yuferov S. Near Yaroslavl, a new railway bridge, the IMZH-500 overpass, was tested. Military Review. *Engineering Troops and Transport.* 2013. URL: https://topwar.ru/32648-pod-yaroslavlem-ispytali-novyy-zheleznodorozhnyy-most-estakadu-imzh-500.html (rus.).

2. Zaets A.A. Ways of development and improvement of the constructive execution of bridge structures for the performance of tasks by railway troops for their regular purpose. *Theory and practice of restoration of artificial structures on railways : collection of scientific papers based on the materials of the industry scientific and practical conference.* 2023; 17-21. EDN EXJADY. (rus.).

3. Lukin A.O., Suvorov A.A. Bridge spans with corrugated steel webs. *Construction of Unique Buildings and Structures.* 2016; 2(41):45-67. EDN VPWHPT. (rus.).

4. Poltoradnev A.S. Variation of shear strength of web panels at designing slender plate girders with flat and corrugated walls. *Bulletin of Civil Engineers.* 2012; 4(33):174-178. EDN PVGQNN. (rus.).

5. Khodiakov V.A., Pastushkov V.G. High technologies in bridge design and construction. *Modernization and Scientific Research in the Transport Sector.* 2013; 3:432-439. EDN QCVHGR. (rus.).

6. Ivanov I.A. Roads of the world. *History and modernity : tutorial.* Moscow, Infra-Engineering, 2017; 282. EDN ZVACLP. (rus.).

7. Smith J. *Crane-Free Bridge Construction: Methods and Case Studies.* Springer, 2019.

8. Kanschyn E. Building bridges on the linear technology cyclic sliding. The German experience. *Newsletter of the Dnipropetrovsk National University of Transport. Academician V. Lazaryan.* 2010; 33:106-110. EDN STRDYN. (rus.).

9. Aduchin D.A., Rusnyac V.I., Tyshkevich E.N. Overview of the design solutions used in the construction of Crimean bridge. *University Science.* 2018; 1(5):15-17. EDN URNXOP. (rus.).

10. Talashkin G.N. Features design and construction of artificial structures for Maglev-roads. *Transportation Systems and Technology.* 2016; 2(4):35-59. EDN XGVSWT. (rus.).

11. Patornyak A.V., Kraeva V.A. The experience of using specialized programs for information modeling of bridges. *Modern challenges and strategies for the development of society in a new reality : collection of materials of the XIX International Scientific and Practical Conference.* 2023; 159-167. EDN LTLGNH. (rus.).

12. Makarov A.V., Kalinovsky S.A. Unification in the design of four-span continuous bridges. *Bulletin of Civil Engineers.* 2021; 3(86):120-126. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-120-126. EDN COIIEV. (rus.).

13. Yudina A.F., Evtyukov S.A., Rozantseva N.V. Development of technology for the installation of spatial structure based on experimental and theoretical studies of the cross-beam system. *Bulletin of Civil Engineers.* 2021; 2(85):102-107. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-102-107. EDN NALSAY. (rus.).

14. Ivanov A.N. Problems of the use of polymer composite materials in the supporting structures of railway bridges. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Communications.* 2020; 3(54):29-37. EDN NMZLHC. (rus.).

15. Salakhutdinov M.A., Aripov D.N., Khanekov A.R., Kiselev S.S. Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass rofile (PFP). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1883-1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895. EDN IAVQCP. (rus.).

16. Kvitko A.V., Orekhov A.V., Petrov K.V. Scientific and experimental substantiation of optimal parameters of the beams spans military railway bridges of composite materials. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy.* 2019; 669:48-52. EDN KQOTHL. (rus.).

17. Melnikov R.V. Cross-rod (structural) structures of coatings, methods of their construction and support options. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov : collection of reports.* 2023; 188-194. EDN FWULAG. (rus.).

18. Potasiev S.S. Space frame structures in domestic design practice and their installation methods. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Archi-

tecture]. 2024; 19(7):1079-1090. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1079-1090. EDN OHWZLG. (rus.).

19. Dolzhikov V.N., Dolzhikova E.N. Experimental studies of the influence of deformations in nodal joints on the stress-strain state in a full-scale support made of MIC-C. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1484-1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493. EDN AISYTD. (rus.).

20. Nadolski V.V. Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1606-1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616. EDN UIGFWY. (rus.).

21. Korgin A.V., Ermakov V.A., Zeyd Kilani L.Z. Getting orthotropic deck plates involved in the structural performance of the bearing structures of bridges made of aluminum alloys. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(7):882-896. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896. EDN LRMBFI. (rus.).

Received June 9, 2025.
Adopted in revised form on September 29, 2025.
Approved for publication on September 30, 2025.

Bionotes: **Nadezhda V. Rozantseva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7138-7182, ID RSCI: 870835, Scopus: 57205443634, ORCID: 0009-0008-1341-4743; nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 338.4:691:339.137.22
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1782-1793

Производственно-технический потенциал как основа конкурентоспособности предприятия промышленности строительных материалов

Инна Ивановна Акулова, Галина Станиславовна Славчева, Светлана Викторовна Беляева
Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на большое количество исследований, касающихся сущности и оценки производственного потенциала промышленных предприятий, ряд вопросов имеет недостаточную проработку, прежде всего, на уровне отдельных отраслей. Кроме того, отсутствует системное восприятие производственно-технического потенциала как основы функционирования и конкурентоспособности предприятия. В этой связи целью работы является идентификация и разработка методики оценки уровня производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов в контексте отраслевой специфики.

Материалы и методы. Для оценки уровня производственно-технического потенциала предлагается интегральный показатель, получаемый в результате синергии ряда относительных показателей с учетом их коэффициентов весомости. В систему показателей оценки наряду с известными (коэффициентом физического износа активной части основных производственных фондов (ОПФ), долей активной части ОПФ, фондовооруженностью труда)) включены вновь введенные показатели, такие как соотношение коэффициентов обновления и выбытия ОПФ, коэффициент прогрессивности технологий. Все коэффициенты весомости, используемые на различных этапах расчета, определяются на основе данных, полученных с помощью электронного анкетирования руководителей производства и работников научно-образовательной сферы.

Результаты. Предложено сущностное определение, в соответствии с которым производственно-технический потенциал промышленного предприятия формируется на основе взаимосвязи применяемых технологий и соответствующих им основных производственных фондов. Разработана система показателей и методика ее оценки. Расчет уровня производственно-технического потенциала нескольких средних и крупных предприятий промышленности строительных материалов Воронежской области, проведенный на основании их обследования, показал, что высоким потенциалом обладает только одно предприятие.

Выводы. Разработанные номенклатура показателей и методика оценки производственно-технического потенциала предприятия отличаются комплексностью и учитывают отраслевую специфику. Апробация результатов исследования обнаружила острую необходимость в модернизации производства на большинстве предприятий промышленности строительных материалов Воронежской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конкурентоспособность предприятия, строительные материалы, производственно-технический потенциал, идентификация понятия, квалиметрический подход, методика оценки, номенклатура показателей

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-18-20051 (URL: https://rscf.ru/project/24-18-20051/).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Акулова И.И., Славчева Г.С., Беляева С.В.* Производственно-технический потенциал как основа конкурентоспособности предприятия промышленности строительных материалов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1782–1793. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1782-1793

Автор, ответственный за переписку: Инна Ивановна Акулова, akulovaii@yandex.ru.

Production and technical potential as the basis of building materials company competitiveness

Inna I. Akulova, Galina S. Slavcheva, Svetlana V. Belyaeva
Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Despite the large number of studies on the nature and assessment of production potential of industrial companies, a number of issues are insufficiently elaborated, especially at the level of individual industries. In addition, there is no systemic perception of production and technical potential as a basis for the functioning and competitiveness of the companies. In this regard, the aim of the paper is to identify and develop a methodology for assessing the level of production and technical potential of the building companies in the context of industry specifics.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

© И.И. Акулова, Г.С. Славчева, С.В. Беляева, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Materials and methods. To assess the level of production and technical potential, we propose an integral indicator obtained as a result of synergy of a number of relative indicators, taking into account their weighting coefficients. The system of evaluation indicators includes known indicators (the physical depreciation coefficient of the active part of the main production assets, the share of their active part, the labor stock), as well as new introduced indicators, such as the ratio of renewal and retirement rates of fixed assets, the coefficient of progressive technologies. All weighting coefficients used at different stages of calculation are determined on the basis of data obtained through electronic survey of production managers and employees of scientific and educational sphere.
Results. An essential definition is proposed, according to which the production and technical potential of building companies is formed on the basis of the relationship between the applied technologies and the corresponding main production means. The system of indicators and the methodology of their evaluation are developed. The calculation of the level of production and technical potential of several medium and large building companies of the Voronezh region, carried out on the basis of their survey, showed that only one enterprise has a high potential.
Conclusions. The developed nomenclature of indicators and the methodology of evaluation of production and technical potential of the building companies are characterized by comprehensiveness and take into account the specifics of the industry. Approval of the research results has revealed the urgent need for modernization of production in most building companies in the Voronezh region.

KEYWORDS: enterprise competitiveness, building materials, production and technical potential, concept identification, qualitative approach, evaluation methodology, indicator nomenclature

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-18-20051 (URL: https://rscf.ru/project/24-18-20051/).

FOR CITATION: Akulova I.I., Slavcheva G.S., Belyaeva S.V. Production and technical potential as the basis of building materials company competitiveness. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1782-1793. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1782-1793 (rus.).

Corresponding author: Inna I. Akulova, akulovaii@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках существующих концепций промышленность строительных материалов рассматривается как структурная составляющая регионального строительного комплекса (РСК) и одновременно как активная, открытая экономическая система. Опосредованно эта отрасль участвует в решении задачи формирования безопасной и комфортной среды жизнедеятельности и способствует росту благосостояния граждан [1].

К основным особенностям продукции отрасли относятся высокая материалоемкость, взаимозаменяемость, продолжительный жизненный цикл, тесная взаимосвязь с потребностями капитального строительства и сырьевой базой региона — места размещения производства [2, 3].

Для эффективной деятельности РСК требуется, чтобы темпы развития производства строительных материалов опережали темпы строительной динамики. Реализация этого положения предполагает проведение оценки территориально-отраслевого состояния и развития промышленности стройматериалов в целях определения заказа для строительной отрасли, выдвигаемой «Стратегией 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) в качестве одной из отраслевых задач. Принимая во внимание указанное, в современных условиях, характеризующихся высокой нестабильностью макроэкономической ситуации, снижением доступности кредитных ресурсов, усилением деструктивных действий недружественных государств, принципиально важным оказывается определение уровня производственно-технического потенциала предприятий стройиндустрии как базиса обеспечения строительства необходимыми материалами и в то же время как основы конкурентоспособности производителей [4–7].

Оценка производственно-технического потенциала предполагает разработку системы показателей, методики оценки и собственно расчет итогового интегрального показателя уровня потенциала по предприятиям промышленности строительных материалов, вошедшим в базу исследования.

К настоящему моменту издано значительное количество трудов, касающихся сущности и структуры экономического и производственного потенциалов промышленных предприятий. Проблемой их оценки занимается широкий круг отечественных и зарубежных ученых: А.М. Анафияев, Е.В. Бартова, Д.А. Камынин, К. Ким, Н.А. Мансурова, Г.С. Мерзликина, Н.Г. Леонова, С.В. Люцук, Д.А. Нижник, П.И. Разиньков, М.К. Старовойтов, С.М. Степанова, Т.В. Учаева, Л.С. Шаховская, Я.К. Фимушкин, Н.Ю. Фомин и др. Однако выполненный обзор публикаций по указанной проблеме показал недостаточную проработку ряда вопросов, прежде всего, на уровне отдельных отраслей и предприятий, имеющих отраслевую специфику. Кроме того, отсутствует целостное восприятие производственно-технического потенциала как основы эффективности функционирования и конкурентоспособности предприятия. С учетом изложенного актуальной становится проблема идентификации и разработки теоретико-методических подходов к оценке уровня производственно-технического потенциала производителей строительных материалов и изделий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Идентификация понятия «производственно-технический потенциал предприятия» и разработка методики его оценки опираются на системное понимание этой категории, которое формируется на основе информации, полученной в процессе литературного обзора трудов отечественных и зарубежных ученых, а также на сложившемся в ходе логического анализа авторском представлении в отношении сущности производственного потенциала предприятия.

Большинство исследователей, рассматривая производственный потенциал как подсистему экономического потенциала промышленного предприятия, обозначают в его структуре следующие элементы: основные производственные фонды; материальные ресурсы; кадровые ресурсы; технологии и информацию [8–12].

Вместе с тем рассмотрение технологического потенциала как самостоятельного структурного элемента, на взгляд авторов настоящего исследования, не вполне корректно, поскольку в рамках современного производства, в том числе и строительных материалов, изделий и конструкций, именно вид применяемой технологии напрямую обусловливает качественный и количественный состав активной части основных производственных фондов (ОПФ) и в то же время косвенно определяет комплекс зданий и сооружений предприятия, его производственную площадь, планировочные решения цехов и складских помещений и др. В этой связи более верным представляется выделение в качестве составляющей производственного потенциала технико-технологической компоненты, формирующей на базе взаимосвязи применяемых технологий и соответствующих им основных производственных фондов производственно-технический потенциал промышленного предприятия.

Относительно информационного потенциала следует указать на его принадлежность наряду с производственным потенциалом к структурным элементам экономического потенциала первого порядка, так как информация служит ресурсом, используемым не только в производстве, но и в прочих видах деятельности предприятия: маркетинговой, инновационной, организационно-управленческой, финансовой.

Таким образом, на основе выполненного анализа и обобщения в структуре производственного потенциала предприятия промышленности строительных материалов предлагается выделять технико-технологическую, материально-сырьевую, кадровую и логистическую компоненты, последняя из которых реализует связующую функцию в отношении остальных элементов производственного потенциала, объединяя их в единую систему.

Проведенные экспертные оценки показали, что наиболее значимой в обеспечении конкурентоспособности предприятия с коэффициентом весомости 0,32 является технико-технологическая компонента, а по сути, производственно-технический потенциал, идентифицированный авторами в соответствии с принципами комплексного и системного подходов как возможность повышения конкурентоспособности предприятия на основе синергии применяемых технологий и основных производственных фондов (рис. 1).

Формирование системы показателей оценки производственно-технического потенциала предприятия осуществлялось с учетом его авторского определения и специфических особенностей промышленности строительных материалов. Анализировались показатели, используемые для характеристики основных производственных фондов и технологической оснащенности. При этом, согласно сущностной трактовке общего понятия потенциала как возможности (от лат. *potentia* — сила, возможности), из рассмотрения были исключены показатели, отражающие эффективность ОПФ, например фондоотдача, коэффициент использования мощности, рентабельность основных средств и др.

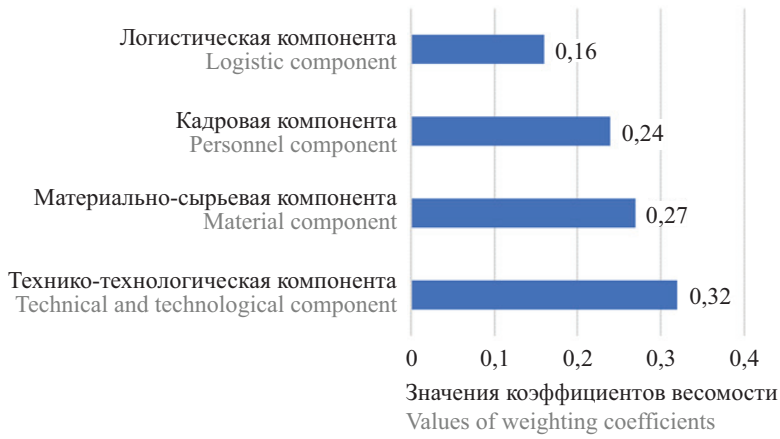


Рис. 1. Результаты оценки коэффициентов весомости структурных компонент производственного потенциала предприятия промышленности строительных материалов

Fig. 1. Results of estimation of the weighting coefficients of structural components of the production potential of the construction materials industry enterprise

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

В итоге номенклатуру показателей производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов составили ранее известные показатели — коэффициент физического износа активной части основных производственных фондов по сроку службы, доля активной части в общей стоимости ОПФ, фондовооруженность труда и показатели, предложенные авторами, — соотношение коэффициентов обновления и выбытия ОПФ, коэффициент прогрессивности технологий. Сущность показателей и схемы их расчета представлены в табл. 1.

На основе разработанной номенклатуры показателей осуществлялась комплексная оценка уровня производственно-технического потенциала, который представляет собой интегральный показатель, фор-

Табл. 1. Номенклатура показателей оценки производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов

Table 1. Nomenclature of indicators for assessing the production and technical potential of the enterprise of the building materials industry

Показатель оценки и его сущность Evaluation indicator and its essence	Схема расчета показателя Scheme for calculating the indicator	Критерий оценки Evaluation criterion
Коэффициент физического износа активной части ОПФ по сроку службы показывает, насколько в среднем ОПФ предприятия утратили свою потребительскую стоимость The coefficient of physical depreciation of the active part of the fixed assets by service life shows how much on average the fixed assets of the enterprise have lost their use value	$K_{\text{физ}}^{\text{сс}} = \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{н}}}$, где $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{н}}$ — соответственно фактический и нормативный срок службы элементов основных фондов (год, месяц) $K_{ph}^{st} = \frac{T_a}{T_s}$, where T_a and T_s — actual and standard service life of fixed assets elements, respectively (year, month)	Чем ближе значение $K_{\text{физ}}^{\text{сс}}$ к 1, тем больше величина износа ОПФ предприятия The closer the value of K_{ph}^{st} is to 1, the greater is the value of depreciation of fixed assets of the enterprise
Доля активной части в общей стоимости ОПФ характеризует прогрессивность структуры ОПФ и наличие возможности их использования с большей эффективностью The share of the active part in the total value of fixed assets characterizes the progressiveness of the structure of fixed assets and the possibility of their use with greater efficiency	$\text{Д}_{\text{акт}} = \frac{\text{ОФ}_{\text{акт}}}{\overline{\text{ОФ}}} \cdot 100\ \%$, где $\text{ОФ}_{\text{акт}}$ и $\overline{\text{ОФ}}$ — соответственно стоимость активной части и среднегодовая стоимость ОПФ, руб. $S_{act} = \frac{FP_{act}}{\overline{FP}} \cdot 100\ \%$, where FP_{act} and FP — respectively, the cost of active part and average annual value of fixed assets, rub.	Если $\text{Д}_{\text{акт}} > 50\ \%$, то это свидетельствует о высокой технической оснащенности производства If $S_{act} > 50\ \%$, it indicates high technical equipment of production
Соотношение коэффициентов обновления и выбытия ОПФ отражает наличие (отсутствие) процесса обновления ОПФ на предприятии The ratio of the ratios of renewal and retirement of fixed assets reflects the presence (absence) of the process of renewal of fixed assets at the enterprise	$K_{\text{сов}} = \frac{k_{\text{обн}}}{k_{\text{выб}}} = \frac{\text{ОФ}_{\text{вв}} \cdot \text{ОФ}_{\text{нг}}}{\text{ОФ}_{\text{у}} \cdot \text{ОФ}_{\text{кг}}}$, где $k_{\text{обн}}$ и $k_{\text{выб}}$ — соответственно коэффициент обновления и коэффициент выбытия элементов основных фондов; $\text{ОФ}_{\text{вв}}$ и $\text{ОФ}_{\text{у}}$ — стоимость элементов основных фондов, соответственно введенных и выведенных из эксплуатации в текущем году, руб.; $\text{ОФ}_{\text{нг}}$ и $\text{ОФ}_{\text{кг}}$ — стоимость основных производственных фондов предприятия соответственно на начало и на конец текущего года, руб. $K_{rat.c} = \frac{k_{ren}}{k_{ret}} = \frac{FP_{com} \cdot FP_{by}}{FP_{dec} \cdot FP_{ey}}$, where k_{ren} and k_{ret} — renewal rate and retirement rate of fixed assets, respectively; FP_{com} and FP_{dec} — cost of fixed assets elements respectively commissioned and decommissioned in the current year, rub.; FP_{by} and FP_{ey} — the value of fixed production assets of the enterprise respectively at the beginning and at the end of the current year, rub.	Значение $K_{\text{сов}} > 1$ свидетельствует о наличии процесса обновления ОПФ на предприятии. Чем выше значение, тем активнее идет процесс обновления основных фондов The value of $K_{rat.c} > 1$ indicates the presence of the process of renewal of fixed assets at the enterprise. The higher the value, the more active is the process of renewal of fixed assets

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Показатель оценки и его сущность Evaluation indicator and its essence	Схема расчета показателя Scheme for calculating the indicator	Критерий оценки Evaluation criterion
Фондовооруженность труда характеризует степень технической оснащенности труда работников предприятия Funded labour capacity characterizes the degree of technical equipment of labour of the enterprise's employees	$\Phi_в = \frac{\overline{ОФ}}{\overline{Ч_{сп}}}$, где $\overline{ОФ}$ — среднегодовая стоимость основных производственных фондов, руб.; $\overline{Ч_{сп}}$ — среднесписочная численность работников предприятия, чел. $F_c = \frac{\overline{FP}}{\overline{N_{av}}}$, where $\overline{FP}$ — average annual cost of fixed production assets, rub; $\overline{N_{av}}$ — average number of employees of the enterprise, persons	Чем выше $\Phi_в$, тем выше степень технической оснащенности труда работников предприятия The higher is F_c, the higher is the degree of technical equipment of labour of the enterprise's employees
Коэффициент прогрессивности технологий отражает уровень соответствия применяемых технологий современному уровню технического развития The coefficient of progressiveness of technologies reflects the level of compliance of applied technologies with the current level of technical development	$K_{прт} = A_1 \cdot K_{ма} + A_2 + М_в + A_3 \cdot Q_{кв.м}$, где A_1, A_2, A_3 — коэффициенты весомости соответствующих показателей ($A_1 = 0{,}45$, $A_2 = 0{,}23$, $A_3 = 0{,}32$)*; $K_{ма}$ — относительный коэффициент автоматизации производства; $М_в$ — относительный показатель механовооруженности труда (техническая вооруженность); $Q_{кв.м}$ — относительный показатель съема продукции с 1 м² производственной площади $K_{pa} = A_1 \cdot K_{pa} + A_2 + M_m + A_3 \cdot Q_{sq.m}$, where A_1, A_2, A_3 — weighting coefficients of the respective indicators ($A_1 = 0.45$, $A_2 = 0.23$, $A_3 = 0.32$)*; K_{pa} — relative coefficient of production automation; M_m — relative indicator of mechanization of labour (technical armament); $Q_{sq.m}$ — relative output per 1 m² of production area	Чем выше значение $K_{прт}$, тем выше степень соответствия применяемых технологий современному уровню технического развития The higher the value of K_{pa}, the higher the degree of compliance of the applied technologies with the current level of technical development

Примечание: * — коэффициенты весомости определены по результатам экспертных оценок.
Note: * — the weighting coefficients are determined based on the results of expert assessments.

мируемый как сумма произведений относительных показателей, характеризующих его состояние, и соответствующих коэффициентов весомости.

Исходя из указанного, общий методический принцип расчета уровня производственно-технического потенциала *j*-го предприятия промышленности строительных материалов, основанный на квалиметрическом подходе, может быть выражен формулой [13–19]:

$$УП_{птj} = \sum_{i=1}^{n} M_i \frac{P_{ij}}{P_i^{опт}}, \quad (1)$$

где n — количество показателей, характеризующих производственно-технический потенциал промышленного предприятия; M_i — коэффициент весомости i-го показателя; P_{ij} — значение i-го показателя по j-му предприятию; $P_i^{опт}$ — наилучшее значение i-го показателя по группе предприятий.

Для определения коэффициентов весомости показателей, представленных в табл. 1, применялся метод экспертных оценок, который осуществлялся в форме электронного анкетирования. В качестве экспертов выступали работники предприятий промышленности строительных материалов и представители научно-образовательной сферы. Обработка результатов опроса и расчет коэффициентов весомости проводился по следующей схеме:

$$M_i = \frac{\overline{M_i}}{\sum_{i=1}^{n} \overline{M_i}}, \quad (2)$$

где $\overline{M_i}$ — средний коэффициент весомости i-го показателя.

В свою очередь:

$$\overline{M_i} = \sum_{g=1}^{G} M_g / r, \quad (3)$$

где M_g — значение балльной оценки g-го эксперта; r — количество экспертов, принявших участие в опросе.

При этом сумма полученных значений всех коэффициентов весомости равнялась 1. Это требо-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

вание обеспечивало сопоставимость проводимых расчетов вне зависимости от количества рассматриваемых показателей [20–23]:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = 1. \quad (4)$$

Результаты оценки коэффициентов весомости показателей, характеризующих уровень производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов, показаны на рис. 2.

Из представленных на рис. 2 данных следует, что коэффициенты весомости четырех из пяти анализируемых показателей различаются незначительно. Тем не менее наиболее важным показателем эксперты считают коэффициент износа основных производственных фондов, а менее существенным — соотношение коэффициентов выбытия и обновления, характеризующее интенсивность реновации основных средств предприятия.

Обработанные результаты экспертных оценок позволили конкретизировать выражение (1) и предложить следующую схему расчета уровня производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов:

$$\text{УП}_{\text{пт}j} = 0,22 \cdot \frac{K_{\text{физ}}^{\text{сс min}}}{K_{\text{физ}j}^{\text{сс}}} + 0,21 \cdot \frac{\Phi_{\text{в}j}}{\Phi_{\text{в}}^{\max}} + 0,2 \cdot \frac{\text{Д}_{\text{акт}j}}{\text{Д}_{\text{акт}}^{\max}} + 0,2 \cdot \frac{K_{\text{пр}tj}}{K_{\text{прт}}^{\max}} + 0,17 \cdot \frac{K_{\text{сов}j}}{K_{\text{сов}}^{\max}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{физ}}^{\text{сс min}}$ — минимальное значение коэффициента физического износа по сроку службы из группы предприятий; $\Phi_{\text{в}}^{\max}$, $\text{Д}_{\text{акт}}^{\max}$, $K_{\text{прт}}^{\max}$, и $K_{\text{сов}}^{\max}$ — максимальные значения соответственно фондовооруженности труда, доли активной части ОПФ, коэффициента прогрессивности технологий и соотношения коэффициентов обновления и выбытия из группы обследуемых предприятий.

Следует уточнить предложенную в процессе проведенных исследований методику расчета коэффициента прогрессивности технологий $K_{\text{прт}}$ [24]. Показатель формируется путем суммирования произведений относительных показателей автоматизации производства, механовооруженности труда, съема продукции с 1 м^2 производственной площади и соответствующих коэффициентов весомости.

Коэффициент автоматизации, механовооруженность труда и съем продукции с 1 м^2 производственной площади j-го предприятия определялись по известным схемам. Однако при расчете последнего более корректным, на взгляд авторов, является использование в числителе проектной мощности, характеризующей именно потенциал предприятия, а не годового объема выпуска продукции, отражающего эффективность его использования. Принимая во внимание указанное, применялись следующие схемы расчета:

- коэффициент автоматизации производства:

$$K_{\text{а}j} = \frac{V_{\text{а}j}}{V_{\text{общ}j}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{а}j}$ — объем технологических операций, произведенных с помощью автоматов и автоматических линий, руб. или нат. ед.; $V_{\text{общ}j}$ — общий объем технологических операций по производству продукции на j-м предприятии, руб. или нат. ед.;

- механовооруженность труда, руб/чел.:

$$M_{\text{в}j} = \frac{\overline{\text{ОФ}}_{\text{акт}j}}{\overline{\text{Ч}}_{\text{р}j}}, \quad (7)$$

где $\overline{\text{ОФ}}_{\text{акт}j}$ — среднегодовая стоимость активной части основных производственных фондов, руб.; $\overline{\text{Ч}}_{\text{р}j}$ — среднесписочная численность основных рабочих j-го предприятия, чел.;

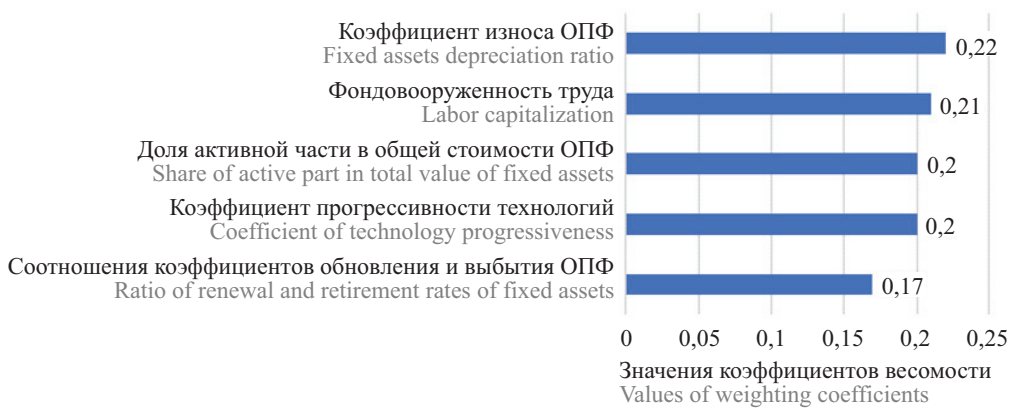


Рис. 2. Результаты оценки коэффициентов весомости показателей, характеризующих уровень производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов

Fig. 2. Results of evaluation of the weighting coefficients of the indicators characterizing the level of production and technical potential of the enterprise of the building materials industry

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

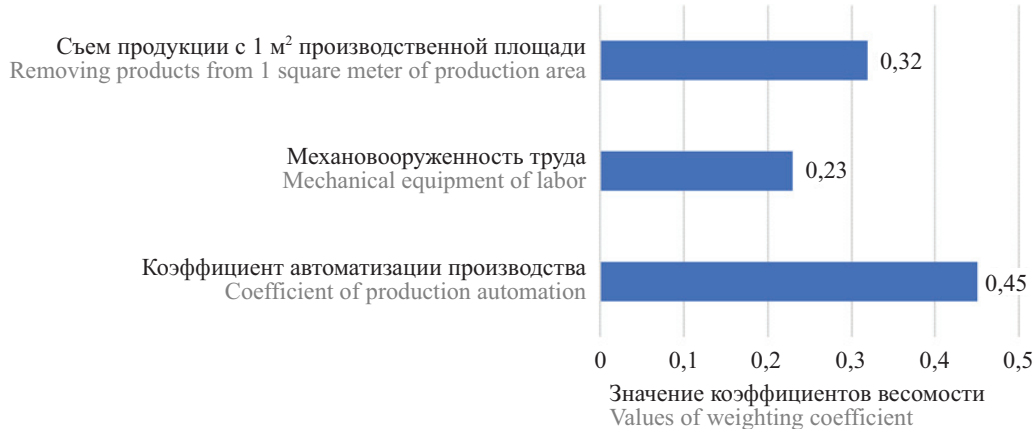


Рис. 3. Результаты расчета коэффициентов весомости показателей, отражающих уровень прогрессивности технологий
Fig. 3. Results of calculating the weighting coefficients of indicators reflecting the level of technology progressiveness

• съем продукции с 1 м² производственной площади, нат. ед./м²:

$$Q_{\text{кв.м}j} = \frac{Q_j^{\text{п}}}{S_{\text{пп}j}}, \quad (8)$$

где $Q_j^{\text{п}}$ — проектная мощность j-го предприятия, нат. ед.; $S_{\text{пп}j}$ — производственная площадь j-го предприятия, м².

С учетом подхода, реализуемого в методе «отношение к референтному значению», относительные значения указанных показателей получают путем деления соответствующего значения по j-му предприятию на максимальное значение данного показателя, выбранного из группы предприятий, которые вошли в аналитическую базу.

Коэффициенты весомости обсуждаемых показателей рассчитывались на основе экспертных оценок по методике, представленной формулами (2) и (3) (рис. 3).

Таким образом, коэффициент прогрессивности технологий j-го предприятия определялся по формуле:

$$K_{\text{прт}j} = 0,45 \cdot \frac{K_{aj}}{K_{\text{а}}^{\max}} + 0,23 \cdot \frac{\text{М}_{\text{в}j}}{\text{М}_{\text{в}}^{\max}} + 0,32 \cdot \frac{Q_{\text{кв.м}j}}{Q_{\text{кв.м}}^{\max}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{а}}^{\max}$, $\text{М}_{\text{в}}^{\max}$, $Q_{\text{кв.м}}^{\max}$ — максимальное значение соответственно коэффициента автоматизации, механовооруженности труда и съема продукции с 1 м² производственной площади в соответствующих единицах измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация предложенных методических подходов к расчету уровня производственно-технического потенциала, включая перечень показателей табл. 1, осуществлялась на примере средних и крупных предприятий промышленности строительных материалов Воронежской области, которые выпускают строительные изделия и конструкции, необходимые для возведения объектов различного назначения, — сборные железобетонные конструкции, силикатный и керамический кирпич.

В аналитическую базу были включены четыре действующих предприятия региона. Для расчета показателей, отражающих уровень их производственно-технического потенциала, использовались как первичные, так и вторичные данные. Сбор первичной информации проводился при обследовании предприятий, а также в процессе анкетирования по предварительно разработанным формам. Вторичные данные получены из интернет-источников, находящихся в открытом доступе. Значения рассчитанных на основе собранной и обработанной информации показателей приведены в табл. 2.

Необходимо пояснить, что для расчета относительных значений показателей, выраженных в формуле (1) отношением $P_{ij} \big/ P_i^{\text{опт}}$, в качестве оптимального значения, находящегося в знаменателе, использовалось наилучшее значение соответствующего показателя из всех, представленных в табл. 2.

В целях обеспечения конфиденциальности первичных данных наименования предприятий не приводятся. Считаем возможным указать только вид продукции: предприятия № 1 и 2 выпускают сборные железобетонные конструкции, предприятие № 3 — силикатный кирпич, предприятие № 4 — керамический кирпич. Результаты оценки производственно-технического потенциала этих предприятий показаны на рис. 4.

В соответствии с данными рис. 4, максимальным уровнем производственно-технического потенциала со значением 0,83 из числа обследованных обладает предприятие № 3, выпускающее силикатный кирпич, а самое низкое значение потенциала имеет предприятие № 4, производящее рядовой керамический кирпич.

Табл. 2. Результаты расчета показателей производственно-технического потенциала системообразующих предприятий промышленности строительных материалов Воронежской области

Table 2. Results of calculating the indicators of production and technical potential of backbone enterprises of the building materials industry in the Voronezh region

Наименование показателей Name of indicators	Значение показателя по предприятиям в 2023 г. Value of the indicator by enterprises in 2023				Наилучшее значение показателя Best value of the indicator
	Предприятие № 1 Company No. 1	Предприятие № 2 Company No. 2	Предприятие № 3 Company No. 3	Предприятие № 4 Company No. 4	
Коэффициент физического износа активной части ОПФ по сроку службы Coefficient of physical depreciation of active part of fixed assets by service life	0,56	0,71	0,56	0,8	0,56
Доля активной части в общей стоимости ОПФ, % Share of active part in total value of fixed assets, %	41,6	56,1	71,6	30,0	71,6
Соотношение коэффициентов обновления и выбытия ОПФ Ratio of renewal and retirement rates of fixed assets	22,14	2,46	1,6	0	22,14
Фондовооруженность труда, тыс. руб/чел. Labour capitalization, thousand rub/person	577,8	611,3	656,5	487,1	656,5
Коэффициент прогрессивности технологий Coefficient of technology progressiveness	0,56	0,79	0.94	0,43	0,94

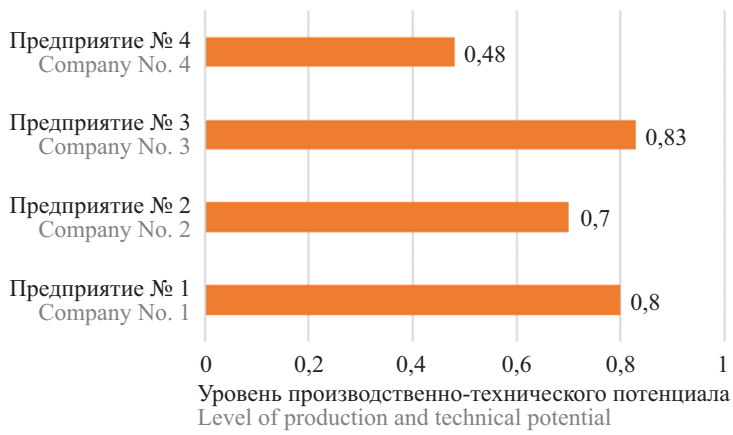


Рис. 4. Результаты оценки уровня производственно-технического потенциала ряда средних и крупных предприятий промышленности строительных материалов Воронежской области

Fig. 4. Results of assessment of the level of production and technical potential of a number of medium and large enterprises of the construction materials industry of the Voronezh region

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований на основе экспертных оценок выявлена существенная значимость производственно-технического потенциала в обеспечении конкурентоспособности промышленного предприятия. С одной стороны, он является подсистемой производственного потенциала предприятия, с другой — это относительно самостоятельная система, формируемая на базе взаимосвязи применяемых технологий и соответствующих им основных производственных фондов.

Предложенная номенклатура показателей оценки производственно-технического потенциала предприятия промышленности строительных материалов учитывает отраслевую специфику, отраженную, в частности, в коэффициенте прогрессивности технологий, который рассчитывается путем суммирования произведений относительных показателей автома-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

тизации производства, механовооруженности труда, съема продукции с 1 м^2 производственной площади и соответствующих коэффициентов весомости.

Апробация разработанной методики оценки производственно-технического потенциала предприятий промышленности строительных материалов, реализованная на примере ряда средних и крупных предприятий Воронежской области, показала, что большинство региональных производителей имеют уровень потенциала, недостаточный для их интенсивного и устойчивого развития в конкурентной среде. Положительное влияние на решение данной проблемы может оказать активизация инновационной деятельности предприятий промышленности строительных материалов. Однако при пока еще невысоком уровне их производственно-технического потенциала, дефиците собственных финансовых средств и низкой доступности кредитных ресурсов такая стратегия вряд ли станет реализуемой в ближайшей перспективе.

Изложенные результаты исследования представляют практический интерес для региональных производителей строительных материалов, изделий и конструкций при формировании планов модернизации производства, а также для административных органов управления регионом при разработке стратегий и инвестиционных программ развития строительной отрасли и ее производственной базы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Федосеев И.В., Васильева Н.В., Юденко М.Н., Васильев А.Н.* Строительный комплекс XXI века : монография. СПб., 2024. 91 с. EDN BTYRAU.

2. *Barbhuiya S., Das B.B.* Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. P. e02326. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02326

3. *Elnour M., Trigaux D., Allacker K.* Dynamic life cycle assessment of building stocks : a systematic review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 218. P. 115682. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115682

4. *Syarief R.* Strengthening the competitiveness of state-owned enterprises // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2024. Vol. 10. Issue 1. P. 100199. DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100199

5. *Li Y., Yu H., Shen Z.* Dynamic prediction of product competitive position: A multisource data-driven competitive analysis framework from a multi-competitor perspective // Journal of Retailing and Consumer Services. 2025. Vol. 85. P. 104289. DOI: 10.1016/j.jretconser.2025.104289

6. *Horta I.M., Camanho A.S.* Competitive positioning and performance assessment in the construction industry // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. Issue 4. Pp. 974–983. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.06.064

7. *Somwethee Ph., Aujirapongpan S., Ru-Zhue J.* The influence of entrepreneurial capability and innovation capability on sustainable organization performance: Evidence of community enterprise in Thailand // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2023. Vol. 9. Issue 2. P. 100082. DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100082

8. *Анафияев А.М.* Производственный потенциал промышленных предприятий и его роль в национальной экономике // Colloquium-Journal. 2022. № 5–2 (128). С. 6–8. DOI: 10.24412/2520-6990-2022-5128-6-8. EDN FTVTYF.

9. *Ибрагимова Р.С., Головкин Д.С.* Экономический потенциал как концепция стратегического управления промышленным предприятием // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2022. Т. 17. № 4. С. 474–486. DOI: 10.17072/1994-9960-2022-4-474-486. EDN HFDLEW.

10. *Kadirova Sh.* Implementing sustainable practices in industrial enterprises: a pathway to economic potential growth // Iqtisodiy taraqqiyot va tahlil. 2024. Vol. 2. Issue 4. Pp. 94–98. DOI: 10.60078/2992-877x-2024-vol2-iss4-pp94-98

11. *Леонова Н.Г., Нижник Д.А.* Эффективное использование основного капитала и разработка стратегии развития производственного потенциала : монография. Хабаровск : Издательство ТОГУ, 2019. 91 с.

12. *Фомин Н.Ю., Мухаметзянова А.И.* Сущность, структура и факторы развития промышленно-производственного потенциала предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 6–2 (88). С. 223–228. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-6-2-223-228. EDN IQIVRH.

13. *Сунь С.* Методический подход к выбору производственной стратегии на основе оценки экономического потенциала промышленного предприятия // Современная экономика: проблемы и решения. 2021. № 10 (142). С. 89–100. DOI: 10.17308/meps.2021.10/2694. EDN VIVVBM.

14. *Камынин Д.А.* Методические подходы анализа экономического потенциала промышленных предприятий // Экономика и предпринимательство. 2021. № 10 (135). С. 1004–1006. DOI: 10.34925/EIP.2021.135.10.193. EDN YLAKXO.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

15. *Степанова С.М., Голощапова Л.В., Сперанский С.Н., Пахотин Н.Е.* Интегральная оценка экономического потенциала промышленного предприятия // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 1 (391). С. 5–10. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_1_5. EDN KCDJDW.

16. *Akulova I.I., Slavcheva G.S.* A New Approach to Identifying Top-Priority Step for Increasing the Building Materials Competitiveness // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. Issue 3. P. 032030. DOI: 10.1088/1757-899x/1079/3/032030

17. *Akulova I.I., Slavcheva G.S., Simonov D.A.* Methodological approaches to assessing the technical and economic efficiency of the building materials and structures' use // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281. P. 08008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128108008

18. *Ibanez-Fores V., Martínez-Sanchez V., Valls-Val K., Bovea M.D.* Sustainability reports as a tool for measuring and monitoring the transition towards the circular economy of organisations: Proposal of indicators and metrics // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 320. P. 115784. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115784

19. *Nowak M., Martineau S., Sobottka T., Ansari F., Schlund S.* An indicator scheme for improving measurability of Sustainable Development Goals in manufacturing enterprises // Procedia Computer Science. 2024. Vol. 232. Pp. 655–664. DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.065

20. *Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Привень А.И., Смирнов В.В.* Квалиметрия в измерении конкурентоспособности // Большой консалтинг. 2014. № 2. С. 22–25. EDN TQGLVV.

21. *Френкель А.А., Сурков А.А.* Определение весовых коэффициентов при объединении прогнозов // Вопросы статистики. 2017. № 12. С. 3–15. EDN YQWNMT.

22. *Linden D., Cinelli M., Spada M., Becker W., Gasser P., Burgherr P.* A framework based on statistical analysis and stakeholders' preferences to inform weighting in composite indicators // Environmental Modelling & Software. 2021. Vol. 145. P. 105208. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105208

23. *Shekhovtsov A.* Evaluating the Performance of Subjective Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making using a novel Weights Similarity Coefficient // Procedia Computer Science. 2023. Vol. 225. Pp. 4785–4794. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.478

24. *Gonzalez M.K., Coll-Araoz M.J., Archenti A.* Enhancing reliability in advanced manufacturing systems: A methodology for the assessment of detection and monitoring techniques // Journal of Manufacturing Systems. 2025. Vol. 79. Pp. 318–333. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.01.015

Поступила в редакцию 7 июня 2025 г.
Принята в доработанном виде 11 июня 2025 г.
Одобрена для публикации 30 сентября 2025 г.

Об авторах: **Инна Ивановна Акулова** — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 256724, Scopus: 57199422204, ResearcherID: V-4514-2018, ORCID: 0000-0003-4061-8684; akulovaii@yandex.ru;

Галина Станиславовна Славчева — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 174467, Scopus: 57195684636, ResearcherID: U-4421-2018, ORCID: 0000-0001-8800-2657; gslavcheva@yandex.ru;

Светлана Викторовна Беляева — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры цифровой и отраслевой экономики; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 635736, Scopus: 56437610100, ResearcherID: W-1655-2018, ORCID: 0000-0002-0771-5661; belyaeva-sv@mail.ru.

Вклад авторов:
Акулова И.И. — научное руководство, концепция исследования, написание текста, итоговые выводы, научное редактирование статьи.
Славчева Г.С. — статистическая обработка данных экспертных опросов, расчет итоговых показателей, написание исходного текста результатов исследования.
Беляева С.В. — литературный обзор, сбор информации, написание исходного текста введения.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fedoseev I.V., Vasilyeva N.V., Yudenko M.N., Vasilyev A.N. *Construction complex of the XXI century : monograph.* St. Petersburg, 2024; 91. EDN BTYRAU. (rus.).

2. Barbhuiya S., Das B.B. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials.* 2023; 19:e02326. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02326

3. Elnour M., Trigaux D., Allacker K. Dynamic life cycle assessment of building stocks : a systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2025; 218:115682. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115682

4. Syarief R. Strengthening the competitiveness of state-owned enterprises. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity.* 2024; 10(1):100199. DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100199

5. Li Y., Yu H., Shen Z. Dynamic prediction of product competitive position: A multisource data-driven competitive analysis framework from a multi-competitor perspective. *Journal of Retailing and Consumer Services.* 2025; 85:104289. DOI: 10.1016/j.jretconser.2025.104289

6. Horta I.M., Camanho A.S. Competitive positioning and performance assessment in the construction industry. *Expert Systems with Applications.* 2014; 41(4):974-983. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.06.064

7. Somwethee Ph., Aujirapongpan S., Ru-Zhue J. The influence of entrepreneurial capability and innovation capability on sustainable organization performance: Evidence of community enterprise in Thailand. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity.* 2023; 9(2):100082. DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100082

8. Anafiyaev A.M. The production potential of industrial enterprises and its role in the national economy. *Colloquium-Journal.* 2022; 5-2(128):6-8. DOI: 10.24412/2520-6990-2022-5128-6-8. EDN FTVTYF. (rus.).

9. Ibragimova R.S., Golovkin D.S. Economic potential as a strategic management concept of the industrial enterprise. *Perm University Herald. ECONOMY.* 2022; 17(4):474-486. DOI: 10.17072/1994-9960-2022-4-474-486. EDN HFDLEW. (rus.).

10. Kadirova Sh. Implementing sustainable practices in industrial enterprises: a pathway to economic potential growth. *Iqtisodiy taraqqiyot va tahlil.* 2024; 2(4):94-98. DOI: 10.60078/2992-877x-2024-vol2-iss4-pp94-98

11. Leonova N.G., Nizhnik D.A. *Efficient use of fixed capital and development of a strategy for the development of productive capacity : monograph.* Khabarovsk, TOGU Publishing House, 2019; 91. (rus.).

12. Fomin N.Yu., Mukhametzyanova A.I. Essence, structure and factors of development of the industrial and production potential of the enterprise. *Economics and Business: Theory and Practice.* 2022; 6-2(88):223-228. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-6-2-223-228. EDN IQIVRH. (rus.).

13. Sun X. Methodological approach to the selection of the production strategy based on the assessment of the economic potential of the industrial enterprise. *Modern Economics: problems and solutions.* 2021; 10(142):89-100. DOI: 10.17308/meps.2021.10/2694. EDN VIVVBM. (rus.).

14. Kamynin D.A. Methodological approaches for analysis of the economic potential of industrial enterp-rises. *Economics and Business.* 2021; 10(135):1004-1006. DOI: 10.34925/EIP.2021.135.10.193. EDN YLAKXO. (rus.).

15. Stepanova S.M., Goloshchapova L.V., Speranskiy S.N., Pakhotin N.E. Integral assessment of the economic potential of industrial enterprises. Proceedings of Higher Educational Institutions. *Textile Industry Technology.* 2021; 1(391):5-10. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_1_5 EDN KCDJDW. (rus.).

16. Akulova I.I., Slavcheva G.S. A New Approach to Identifying Top-Priority Step for Increasing the Building Materials Competitiveness. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering.* 2021; 1079(3):032030. DOI: 10.1088/1757-899x/1079/3/032030

17. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Simonov D.A. Methodological approaches to assessing the technical and economic efficiency of the building materials and structures' use. *E3S Web of Conferences.* 2021; 281:08008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128108008

18. Ibanez-Fores V., Martínez-Sanchez V., Valls-Val K., Bovea M.D. Sustainability reports as a tool for measuring and monitoring the transition towards the circular economy of organisations: Proposal of indicators and metrics. *Journal of Environmental Management.* 2022; 320:115784. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115784

19. Nowak M., Martineau S., Sobottka T., Ansari F., Schlund S. An indicator scheme for improving measurability of Sustainable Development Goals in manufacturing enterprises. *Procedia Computer Science.* 2024; 232:655-664. DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.065

20. Azgal'dov G.G., Kostin A.V., Priven' A.I., Smirnov V.V. Qualimetry in the measurement of competitiveness. *Big Consulting.* 2014; 2:22-25. EDN TQGLVV. (rus.).

21. Frenkel A.A., Surkov A.A. Determination of weighting factors in combining forecasts. *Voprosy Statistiki.* 2017; 12:3-15. EDN YQWNMT. (rus.).

22. Linden D., Cinelli M., Spada M., Becker W., Gasser P., Burgherr P. A framework based on statistical analysis and stakeholders' preferences to inform weighting in composite indicators. *Environmental Modelling & Software.* 2021; 145:105208. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105208

23. Shekhovtsov A. Evaluating the Performance of Subjective Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making using a novel Weights Similarity Coefficient. *Procedia Computer Science.* 2023; 225:4785-4794. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.478

24. Gonzalez M.K., Coll-Araoz M.J., Archenti A. Enhancing reliability in advanced manufacturing systems: A methodology for the assessment of detection and monitoring techniques. *Journal of Manufacturing Systems.* 2025; 79:318-333. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.01.015

Received June 7, 2025.
Adopted in revised form on June 11, 2025.
Approved for publication on September 30, 2025.

Bionotes: **Inna I. Akulova** — Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20th Anniversary of October st., 394006, Voronezh, Russian Federation; ID RSCI: 256724, Scopus: 57199422204, ResearcherID: V-4514-2018, ORCID: 0000-0003-4061-8684; akulovaii@yandex.ru;

Galina S. Slavcheva — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20th Anniversary of October st., 394006, Voronezh, Russian Federation; ID RSCI: 174467, Scopus: 57195684636, ResearcherID: U-4421-2018, ORCID: 0000-0001-8800-2657; gslavcheva@yandex.ru;

Svetlana V. Belyaeva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Digital and Sectoral Economics; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20th Anniversary of October st., 394006, Voronezh, Russian Federation; ID RSCI: 635736, Scopus: 56437610100, ResearcherID: W-1655-2018, ORCID: 0000-0002-0771-5661; belyaeva-sv@mail.ru.

Contribution of the authors:
Inna I. Akulova — scientific guidance, research concept, writing the text, final conclusions, scientific editing of the article.
Galina S. Slavcheva — statistical processing of expert survey data, calculation of final indicators, writing the original text of the research results.
Svetlana V. Belyaeva — literature review, information collection, writing the initial text of the introduction.
The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 65.011.56
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1794-1805

Особенности цифровизации предприятий различных видов деятельности

Татьяна Николаевна Кисель[1], Юлия Сергеевна Прохорова[1], Цзюй Чжиминь[2]
[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
[2] Китайская строительная компания «China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd»; Китайская Народная Республика

АННОТАЦИЯ

Введение. Цифровизация и цифровая трансформация (ЦТ) являются ключевыми трендами развития инвестиционно-строительной сферы (ИСС) как в России, так и в мире. При этом в исследованиях вопросы цифровизации и ЦТ часто рассматриваются обобщенно по отношению ко всем предприятиям сферы, либо выделяется одна узкая группа предприятий. Цель исследования — определение специфических особенностей ЦТ предприятий ИСС различной функциональной направленности по таким важным в настоящий момент аспектам, как кадры, включая вопросы дефицита квалифицированных кадров, а также сопротивление изменениям со стороны менеджмента и сотрудников предприятий в процессе перехода на цифровые технологии. Объектом исследования выступают предприятия ИСС, выполняющие в рамках реализации инвестиционно-строительных проектов различные функции, т.е. предприятия различной функциональной направленности.

Материалы и методы. Основа исследования — сведения, собранные при изучении процессов цифровизации российских предприятий ИСС методом социологического опроса с помощью онлайн-анкеты. Собранные в ходе онлайн-анкетирования первичные данные прошли статистическую обработку, затем с помощью метода факторного анализа выявлены специфические особенности, присущие предприятиям в зависимости от их вида деятельности (функциональной направленности).

Результаты. Приведены результаты оценки респондентами уровня дефицита квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, как в целом по выборке, так и в разрезе групп предприятий, объединенных по схожести выполняемых функций. Также установлен уровень сопротивления изменениям в целом по выборке и по группам предприятий, включая определение группы сотрудников, проявляющих сопротивление изменениям. В наибольшей степени сопротивление изменениям характерно для рядовых сотрудников, однако и в группе руководителей, и менеджеров среднего звена оно присутствует на значимом уровне.

Выводы. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о необходимости планирования и организации процессов цифровизации и ЦТ с учетом изученных аспектов и научно обоснованных предложений по снижению сопротивления изменениям в таких случаях. Применение мероприятий по снижению сопротивления изменениям даст возможность сократить его негативные проявления и повысит эффективность процессов цифровизации и цифровой трансформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровизация, цифровая трансформация, инвестиционно-строительная сфера, дефицит кадров, сопротивление изменениям, организация цифровой трансформации, барьеры цифровой трансформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С., Чжиминь Ц.* Особенности цифровизации предприятий различных видов деятельности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1794–1805. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1794-1805

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Кисель, doremi2@yandex.ru.

Digitalization of investment and construction enterprises focused on various activities

Tatiana N. Kisel[1], Yulia S. Prokhorova[1], Ju Zhimin[2]
[1] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;
[2] Chinese construction company "China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd"; Republic of China

ABSTRACT

Introduction. Digitalization and digital transformation are key development trends manifested by the investment and construction industry in Russia and worldwide. However, in research, digitalization and digital transformation are often considered generically in relation to all enterprises in the field, or, alternatively, one small group of enterprises is identified. The purpose of this study is to identify industry-specific characteristics of digital transformation in the field of personnel man-

© Т.Н. Кисель, Ю.С. Прохорова, Ц. Чжиминь, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

agement, including shortage of qualified personnel, resistance of management and employees to changes in the process of transition to digital technologies. The study focuses on enterprises performing different activities within the framework of investment and construction projects.

Materials and methods. The research is backed by the data collected by launching a sociological survey and an online questionnaire within the framework of a study of digitalization implemented at Russian construction enterprises. The data thus collected were statistically processed, and factor analysis was applied to find correlation between characteristics of enterprises and their main activities (functional orientation).

Results. Respondents analyzed the shortage of qualified personnel proficient in digital technologies. Integrated analysis is presented; it is also broken down by groups of enterprises clustered by functions. In the same manner, resistance to change was also analyzed; as a result, a group that is resistant to change was identified. This behaviour is typical for regular employees; however, it is also largely demonstrated by executives and mid-level managers.

Conclusions. The analysis underlies the conclusion about the need to plan and streamline processes of digitalization and digital transformation, taking into account all studied aspects and scientifically grounded proposals to reduce resistance to change in such cases. Measures taken to reduce resistance to change will reduce its negative manifestations and increase the efficiency of digitalization and digital transformation processes.

KEYWORDS: digitalization, digital transformation, investment and construction industry, personnel shortage, resistance to change, resistance factors, barriers to digital transformation

FOR CITATION: Kisel T.N., Prokhorova Yu.S., Zhimin Ju. Digitalization of investment and construction enterprises focused on various activities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1794-1805. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1794-1805 (rus.).

Corresponding author: Tatiana N. Kisel, doremi2@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство — одна из важнейших отраслей экономики, формирующая материальную основу жизнедеятельности во всех ее проявлениях в любой стране. Высокая значимость строительной отрасли и необходимость ее эффективного развития определяется тем местом, которое она занимает в экономике. По данным Всемирного экономического форума, 10 трлн долларов США составляют 6 % мирового валового внутреннего продукта [1]. В России доля строительства в ВВП, по сведениям Росстата на конец 2024 г., чуть ниже общемировой и составляет 5 %, а по объему формируемой валовой добавленной стоимости строительство занимает 8-е место[1].

При такой высокой значимости отрасли и с учетом ее трудо-, материало- и капиталоемкости многими отмечается ее низкая эффективность по целому ряду аспектов. Так, указывается на ее негативное влияние на окружающую среду [2], в том числе высокий уровень выбросов [3, 4]; большую долю непроизводительных потерь — до 30 % [5–7]; регулярный срыв сроков строительства[2] [8]; перерасход средств по сравнению со сметными расчетами[2] [8, 9]; низкую производительность труда [10–13], простои и переделки на строительной площадке [14], приводящие к значительным материальным и финансовым потерям [15]; и другие проблемы, связанные с низким уровнем взаимодействия и конфликтами участников инвестиционно-строительных проектов (ИСП) [16, 17], что также влияет на качество строительства.

Перспективы решения этих проблем реализации строительных проектов во многом определяются развитием информационных технологий, включая распространение технологий информационного моделирования (ТИМ), позволяющих обеспечить высокое качество проектной документации и организовать совместную работу над информационной моделью на всех этапах жизненного цикла объекта строительства, а также прочие технологии, дающие возможность автоматизировать различные процессы производственного, вспомогательного и управленческого характера, в том числе технологии искусственного интеллекта, блокчейн, интернет вещей и т.д. Однако уровень цифровизации предприятий инвестиционно-строительной сферы (ИСС) по результатам различных исследований оценивается как низкий[3, 4, 5] [18].

При этом необходимо учитывать, что ИСС состоит из предприятий различной функциональной направленности, совместная работа которых позволяет реализовать инвестиционно-строительные проекты. В состав предприятий ИСС входят как непосредственно строительные организации (осуществляющие функции генерального подрядчика,

[1] Федеральная служба государственной статистики. Строительство. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/14458

[2] CURT. Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation: WP-1202. Cincinnati, OH : The Construction Users Roundtable, 2004.

[3] Индекс «Цифровая Россия» // Scolkovo 2023. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Report_Full_2019-04_ru.pdf

[4] Национальный индекс развития цифровой экономики (Госкорпорация Росатом) // Министерство энергетики Российской Федерации (Минэнерго России). 2023. URL: https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/df0/df063a504b10a3af5a1ce7cbb07e35fd.pdf

[5] Цифровая трансформация в России – 2020. Аналитический отчет на базе опроса представителей российских компаний // Команда-А Менеджмент. 2020. URL: https://komanda-a.pro/projects/dtr_2020

подрядчика), так и проектировщики, архитекторы, заказчики, застройщики, девелоперы, эксплуатирующие организации и т.д. В рамках различных исследований, посвященных вопросам внедрения ТИМ, было доказано, что процессы внедрения ТИМ имеют определенную специфику для различных предприятий ИСС. Различия между предприятиями ИСС различной функциональной направленности выявлены также и по прочим аспектам цифровизации и цифровой трансформации (ЦТ) — эти различия касаются инициаторов процесса ЦТ, наиболее востребованных цифровых компетенций и другого. При этом в исследованиях часто вопросы цифровизации и ЦТ рассматриваются либо обобщенно — по отношению ко всем предприятиям ИСС [19], либо выделяется одна узкая группа предприятий (например, проектировочные организации, производители строительных материалов, изделий и конструкций и др.) [20, 21]. Исследования, комплексно рассматривающие различные аспекты ЦТ по отношению к различным предприятиям ИСС, встречаются крайне редко. Однако они могут быть полезны, так как могут продемонстрировать особенности, которые необходимо учитывать менеджменту различных по выполняемым функциям предприятий ИСС для обеспечения планирования, организации и координации процесса внедрения цифровых технологий в целях повышения эффективности ЦТ.

Цель данного исследования — определение специфических особенностей ЦТ предприятий ИСС различной функциональной направленности по таким важным в настоящий момент аспектам, как кадры, включая вопросы дефицита квалифицированных кадров, а также сопротивления изменениям со стороны менеджмента и сотрудников предприятий в процессе перехода на цифровые технологии.

Объектом исследования выступают предприятия ИСС, выполняющие в рамках реализации ИСП различные функции, т.е. предприятия различной функциональной направленности.

Применены методы социологического исследования с последующим факторным анализом полученных первичных сведений. Соответственно, в качестве предмета исследования выступали мнения сотрудников предприятий ИСС (с учетом их функциональной направленности) по отдельным аспектам ЦТ их предприятий.

Результаты исследования могут быть интересны менеджменту предприятий ИСС при планировании и проведении цифровизации и цифровой трансформации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первичные данные собраны в ходе изучения уровня цифровизации российских предприятий ИСС, проведенного в форме выборочного заочного опроса в виде онлайн-анкетирования.

Целевой аудиторией являлись представители предприятий и организаций ИСС различных видов деятельности. В качестве инструмента исследования использована онлайн-анкета, включающая раздел информации о респонденте и месте его работы, а также блок тематических вопросов, связанных с цифровизацией и цифровой трансформацией предприятий ИСС. Результаты обработки полученных в ходе исследования сведений опубликованы авторами ранее [22], однако они были ориентированы на представление общей картины уровня цифровизации российских предприятий ИСС без учета особенностей цифровизации для предприятий различной функциональной направленности.

Объем выборки составил 355 респондентов. Для структуризации выборки одним из вопросов анкеты стал вопрос о виде деятельности предприятия, в котором работает респондент. В структуру выборки попали представители предприятий следующих видов деятельности: архитектор (3,1 %); генподрядчик (6,6 %); государственное/муниципальное учреждение (разных профилей) (17,7 %); девелопер (7 %); застройщик (2,8 %); образовательное учреждение (осуществляющее подготовку кадров для строительной отрасли) (2,8 %); орган исполнительной власти (18,6 %); организация, осуществляющая строительный контроль (1,1 %); подрядчик/субподрядчик (7 %); проектировщик (16,3 %); производитель/поставщик строительных материалов (1,1 %); профессиональное объединение (1,4 %); судебная экспертиза (0,6 %); технический заказчик (6,2 %); экспертиза проектной документации (1,1 %); эксплуатирующая организация (2,5 %); инвестор (0,6 %); прочие (3,7 %).

В настоящем исследовании поставлена цель определения специфических особенностей ЦТ предприятий ИСС различной функциональной направленности. Для достижения этой цели полученная структура выборки требует укрупнения, так как анализ по группам респондентов-представителей предприятий, составляющих незначительную долю в выборке (0,6–2,8 %), не даст значимого результата. Такое укрупнение может быть проведено либо путем отсечения групп респондентов, составляющих незначительную долю в выборке, и дальнейшим факторным анализом данных по более крупным группам, либо путем объединения групп предприятий в более крупные аналитические группы по схожей функциональной направленности организаций респондентов. Так, например, архитекторы и проектировщики, формирующие проектную документацию и принимающие основное участие в ИСП именно на этапе проектирования, могут быть объединены для дальнейшего анализа в одну группу с условным названием «Проектировщики». Организации, осуществляющие строительный контроль, технические заказчики и организации, выполняющие экспертизу проектной документации,

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

выполняют функции контроля на различных этапах реализации проекта и также могут быть объединены в одну группу «Контролирующие организации» и т.д. Результаты укрупнения структуры выборки в соответствии с принципом схожести выполняемых функций представлены в табл. 1.

В ходе исследования собрана первичная информация, в том числе о дефиците квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, а также о наличии на предприятиях респондентов, которые являются сторонниками сопротивления изменениям, а именно сопротивления процессам цифровизации и цифровой трансформации (учитывалась возможность такого сопротивления как со стороны сотрудников предприятий, так и со стороны менеджмента среднего звена и непосредственно руководства). Данные прошли статистическую обработку, а затем с помощью метода факторного анализа были выявлены специфические особенности, присущие предприятиям в зависимости от их вида деятельности (функциональной направленности) по определенным в табл. 1 укрупненным группам. Далее рассмотрим результаты анализа.

Табл. 1. Распределение респондентов по укрупненным группам в соответствии с видом деятельности предприятий

Table 1. Breakdown of respondents by enlarged groups according to the type of corporate activity

Основной вид деятельности организации респондента The main activity of the respondent's corporate employer	Название укрупненной группы Name of the enlarged group	Доля укрупненной группы в выборке, % Percentage of the enlarged group in the sampling, %
Архитектор Architect	Проектировщики Designers	19,4
Проектировщик Designer		
Генподрядчик General contractor	Исполнители Performers	13,8
Подрядчик/субподрядчик Contractor/subcontractor		
Государственное/муниципальное учреждение State/municipal institution	Государственные организации Government organizations	17,7
Девелопер Developer	Инвесторы Investors	10,4
Инвестор Investor		
Застройщик Developer		
Образовательное учреждение (осуществляющее подготовку кадров для строительной отрасли) Educational institution (providing personnel training for the construction industry)	Университеты Universities	2,8
Орган исполнительной власти Executive authority	Государство State	18,6
Организация, осуществляющая строительный контроль Organization that carries out construction control	Контролирующие организации Controlling organizations	8,5
Технический заказчик Technical customer		
Экспертиза проектной документации Examination of project documentation		
Эксплуатирующая организация Operating organization	Эксплуатирующая организация Operating organization	2,5
Производитель/поставщик строительных материалов Manufacturer/supplier of building materials	Прочие организации Other organizations	6,2
Профессиональное объединение Professional association		
Судебная экспертиза Forensic examination		
Прочие Others		

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установлено, что дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, служит серьезной проблемой для предприятий ИСС, находящихся в процессе цифровизации и ЦТ деятельности. О наличии такого дефицита заявили 75 % респондентов, и только 7 % отмечают его отсутствие (рис. 1).

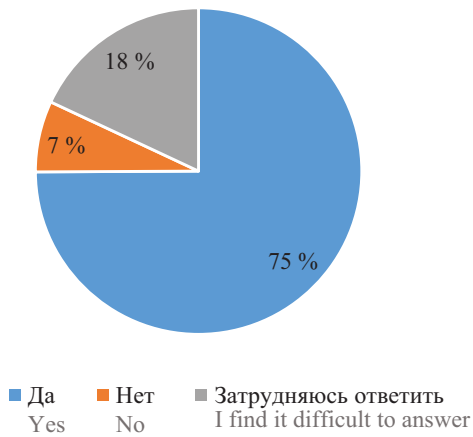


Рис. 1. Распределение ответов респондентов на вопрос «Испытывает ли ваша организация дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий?» (составлено авторами)

Fig. 1. Breakdown of respondents' answers to the question "Does your organization suffer from shortage of qualified personnel with digital technology competencies?" (compiled by the authors)

Результаты проведенного факторного анализа собранных сведений позволили определить, что дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, организации ИСС испытывают в разной степени в зависимости от их функциональной направленности (табл. 2).

Наиболее остро такой дефицит ощущается на предприятиях из группы проектировщиков, в органах исполнительной власти, группе исполнителей и эксплуатирующих организаций. В наименьшей степени (с учетом общего серьезного дефицита кадров на рынке труда в России в настоящее время) — государственные и муниципальные учреждения, а также в группе прочих предприятий и организаций. Такой разброс в результатах оценки респондентами уровня дефицита кадров объясняется тем, что для осуществления различных функций требуются специалисты с различными компетенциями и умением работать в различном программном обеспечении. То есть дефицитны определенные компетенции, востребованные на предприятиях того или иного вида деятельности.

Отсутствие необходимых компетенций в области цифровых технологий, неуверенность в своей способности их освоить, быть конкурентоспособным и выполнять трудовые обязанности в условиях цифровизации и цифровой трансформации деятельности предприятия, а также необходимость затрачивать время на изучение новых технологий (в условиях, как правило, постоянно присутствующей высокой интенсивности труда) зачастую приводят к появлению такого явления, как сопротивление изменениям. Оно может проявляться в различных

Табл. 2. Результаты факторного анализа ответов респондентов по вопросу дефицита кадров с учетом вида деятельности предприятий

Table 2. Results of the factor analysis of respondents' answers to the question about personnel shortage, taking into account types of corporate activities

Название укрупненной группы Enlarged group	Да, % Yes, %	Нет, % No, %	Затрудняюсь ответить, % Not sure, %
Проектировщики Designers	83	9	9
Исполнители Work performers	78	4	18
Государственные организации Government organizations	67	2	32
Инвесторы Investors	73	14	14
Университеты Universities	70	0	30
Государство State	83	5	12
Контролирующие организации Controlling organizations	70	7	23
Эксплуатирующая организация Operating organization	78	22	0
Прочие организации Other organizations	55	18	27

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

формах: от снижения мотивации к эффективному труду до открытого саботажа задач, связанных с внедрением цифровых технологий и соответствующими изменениями процессов на предприятии. Сопротивление изменениям рассматривается исследователями как важный фактор, снижающий эффективность организационных преобразований, в том числе процессов цифровизации и ЦТ.

В результате опроса выявлено, что в 34 % случаев респондентами отмечается наличие сопротивления процессам цифровизации и ЦТ внутри их предприятий (рис. 2). При этом количество респондентов, затруднившихся ответить на вопрос о наличии сопротивления изменениям на их предприятиях, оказалось весомым — 32 %. Безусловно, и в данной группе предприятий также оно может присутствовать в той или иной мере.

Однако для эффективной работы с сопротивлением изменениям необходимо понимать его основные источники. Для этого респондентам было предложено отметить категории персонала предприятия, которые проявляют сопротивление процессам цифровизации и ЦТ (с возможностью выбрать как одну, так и несколько категорий).

Из числа отметивших наличие сопротивления изменениям на их предприятиях 43 % респондентов отметили, что его источником выступает руководство организации, 41 % — менеджеры среднего звена, и в большинстве случаев — 71 % опрошенных — наблюдается сопротивление изменениям со стороны рядовых сотрудников (рис. 3).

Дополнительный анализ данных исследования с учетом фактора вида деятельности предприятия показал, что этот фактор в значительной степени определяет источник сопротивления изменениям (табл. 3).

Так, наименьшее сопротивление изменениям (на уровне 20–24 %) со стороны руководства наблюдается в группе предприятий проектировщиков, государственных и муниципальных организациях и эксплуатирующих организациях, самое высокое — в организациях группы исполнителей (генеральные подрядчики, подрядчики и субподрядчики), а также прочих организациях (более 70 %).

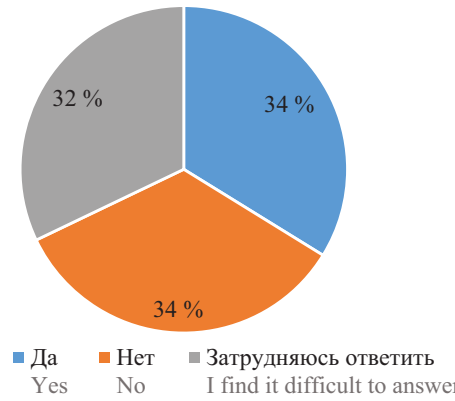


Рис. 2. Распределение ответов респондентов на вопрос «Имеется ли в вашей организации сопротивление процессам цифровизации (сопротивление изменениям)?» (составлено авторами)

Fig. 2. Breakdown of respondents' answer to the question "Does your organization experience resistance to digitalization processes (resistance to change)?" (compiled by the authors)

Сопротивление изменениям со стороны менеджмента среднего звена распределено по предприятиям различной функциональной направленности в целом достаточно равномерно с небольшими колебаниями — от 30 до 40 %. Однако на этом фоне выделяются вузы, осуществляющие подготовку кадров для строительной отрасли, где такое сопротивление изменениям отмечено в 100 % случаев; прочие организации; а также органы исполнительной власти, где доля респондентов, отметивших сопротивление изменениям со стороны менеджеров среднего звена, составила 48 %, т.е. почти половину опрошенных.

По уровню сопротивления изменениям со стороны рядовых сотрудников выделяются предприятия группы проектировщиков, где оно достигает 85 %. Такой уровень сопротивления изменениям связан с тем, что для сотрудников, выполняющих задачи

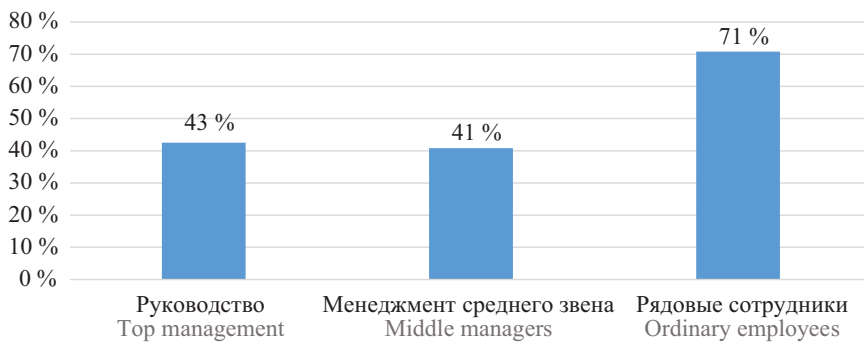


Рис. 3. Распределение ответов респондентов на вопрос об источнике сопротивления процессам цифровизации (с возможностью отметить как один, так и несколько вариантов ответа)

Fig. 3. Breakdown of respondents' answers to the question about the source of resistance to digitalization processes (one or several possible answers can be ticked)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Табл. 3. Результаты факторного анализа ответов респондентов на вопрос об источнике сопротивления процессам цифровизации и цифровой трансформации с учетом вида деятельности предприятий

Table 3. Results of factor analysis of respondents' answers to the question about the source of resistance to digitalization and digital transformation processes, taking into account the type of corporate activity

Название укрупненной группы Enlarged group	Руководство, % Management, %	Менеджеры среднего звена, % Middle managers, %	Рядовые сотрудники, % Ordinary employees, %
Проектировщики Designers	22	30	85
Исполнители Work performers	72	44	50
Государственные организации Government organizations	24	33	71
Инвесторы Investors	64	43	57
Университеты Universities	67	100	67
Государство State	43	48	78
Контролирующие организации Controlling organizations	40	20	80
Эксплуатирующая организация Operating organization	20	40	60
Прочие организации Other organizations	75	75	75

проектирования, внедрение цифровых технологий (в данном случае прежде всего технологий информационного моделирования) вызывает значительный рост трудовой нагрузки. Наименьшее сопротивление изменениям оказывают рядовые сотрудники предприятий из группы исполнителей — 50 % по сравнению со средним показателем по выборке 71 %, а также из группы предприятий инвесторов — 57 %.

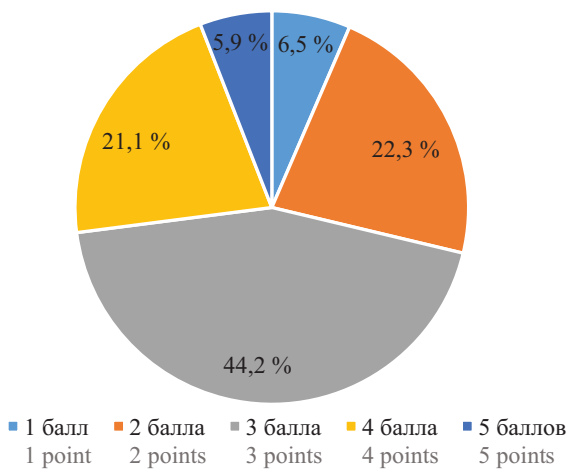


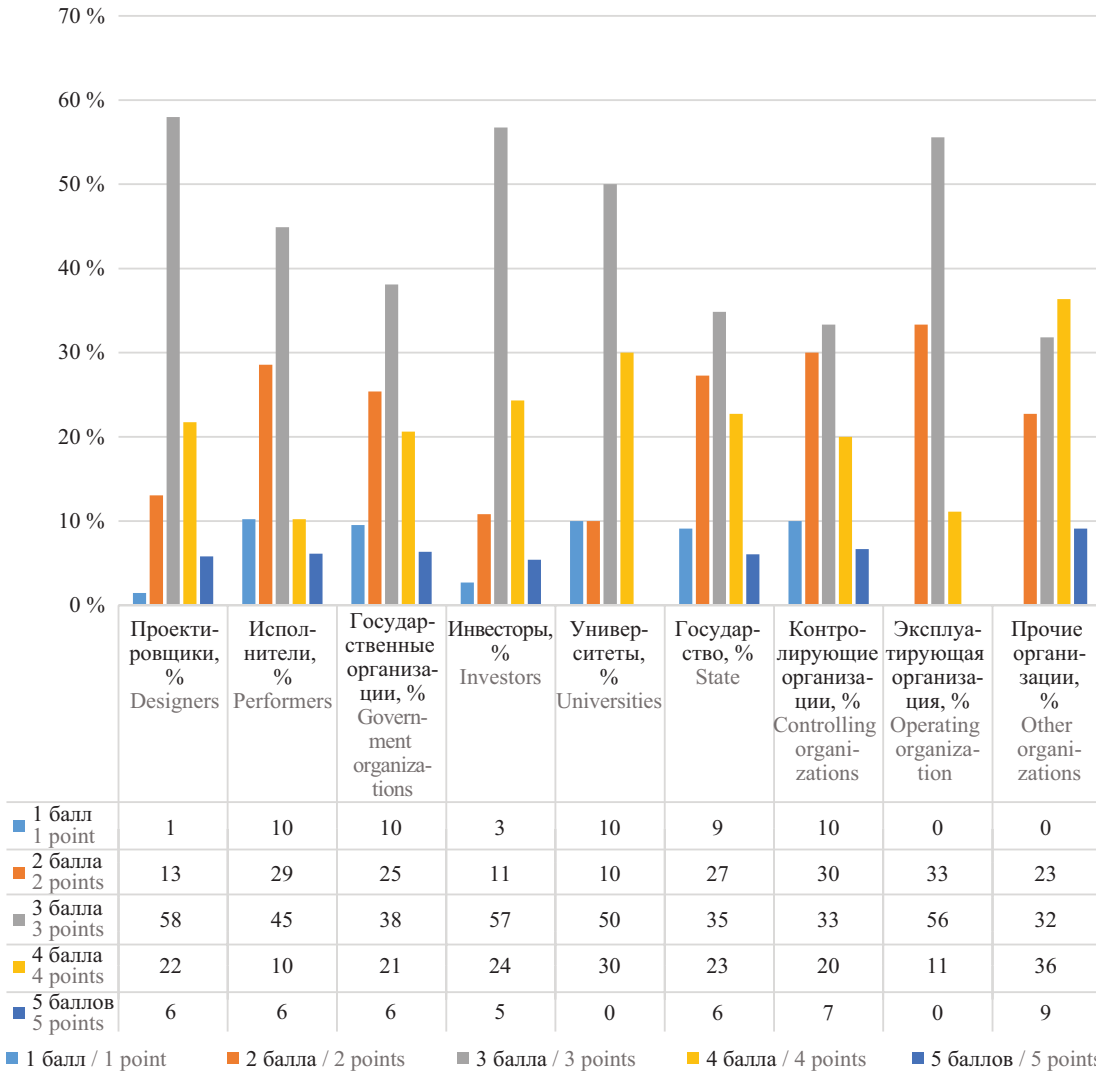
Рис. 4. Распределение ответов респондентов на вопрос «Сравните ожидания от внедрения цифровых технологий и реально полученный эффект по шкале от 1 до 5, где 1 — реальный эффект полностью не соответствует ожиданиям и не оправдал их; 3 — полученный эффект полностью соответствует ожиданиям; 5 — реально полученный эффект значительно превосходит изначальные ожидания»

Fig. 4. Breakdown of respondents' answers to the question "Compare expectations from the introduction of digital technologies and their actual effect on a scale from 1 to 5, where 1 means that the actual effect neither did not, nor does not comply with expectations; 3 means that the effect complies with expectations; 5 means that the actual effect exceeds initial expectations by far"

Отдельно следует указать, что серьезное сопротивление изменениям присутствует несмотря на то, что результаты внедрения цифровых технологий в основном респондентами отмечаются как достаточно высокие. Так, в ходе исследования респондентам необходимо было сравнить ожидания от внедрения цифровых технологий и реально полученный эффект по шкале от 1 до 5 баллов, где 1 балл означал, что реальный эффект полностью не соответствует ожиданиям и не оправдал их; 3 балла — полученный эффект полностью соответствует ожиданиям; 5 баллов — реально полученный эффект значительно превосходит изначальные ожидания. В результате установлено, что почти половина опрошенных (44,2 %) считают, что полученный в ходе внедрения эффект полностью оправдал ожидания, а 27 % утверждают, что эффект превзошел ожидания (в том числе для 5,9 % опрошенных — значительно превзошел ожидания). Соответственно, для 71,3 % результаты цифровизации и ЦТ являются высокими. Есть, однако, и те представители организаций, которые отмечали, что полученный эффект оказался ниже ожиданий — 28,7 % (в том числе 6,5 % поставили лишь 1 балл) (рис. 4).

Следует заметить, что и в вопросе удовлетворенности результатами внедрения цифровых технологий в ходе факторного анализа выявлены специфические особенности, связанные с видом деятельности пред-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025



	Проектировщики, % Designers	Исполнители, % Performers	Государственные организации, % Government organizations	Инвесторы, % Investors	Университеты, % Universities	Государство, % State	Контролирующие организации, % Controlling organizations	Эксплуатирующая организация, % Operating organization	Прочие организации, % Other organizations
1 балл 1 point	1	10	10	3	10	9	10	0	0
2 балла 2 points	13	29	25	11	10	27	30	33	23
3 балла 3 points	58	45	38	57	50	35	33	56	32
4 балла 4 points	22	10	21	24	30	23	20	11	36
5 баллов 5 points	6	6	6	5	0	6	7	0	9

Рис. 5. Результаты факторного анализа ответов респондентов на вопрос о соответствии ожиданий от внедрения цифровых технологий и реально полученного эффекта

Fig. 5. Results of factor analysis of respondents' answers to the question about the compliance between expectations from the introduction of digital technologies and their actual effect

приятий респондентов. Так, наименьшую удовлетворенность результатами цифровизации высказывали представители предприятий из групп исполнителей, государственных организаций, группы «государство» (представители органов власти), контролирующие и эксплуатирующие организации — в каждой из этих групп 1/3 и более респондентов отмечали низкий эффект цифровизации (1 или 2 балла) (рис. 5).

Наиболее удовлетворенными результатами внедрения цифровых технологий оказались представители предприятий из группы проектировщиков и инвесторов — низкие баллы поставлены не более чем в 15 % случаев. Такие результаты могут быть связаны с особенностями деятельности предприятий различных видов деятельности — внедряемым программным обеспечением и выполняемыми с его помощью функциями, необходимостью обучения персонала работе с новыми технологиями, а также стоимостью, длительностью и сложностью обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено наличие специфических особенностей ЦТ предприятий ИСС различной функциональной направленности по таким важным аспектам организации и проведения преобразований, как дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, а также по уровню и источнику сопротивления изменениям процессов внедрения цифровых технологий и соответствующим им преобразованиям бизнес-процессов предприятий. Как известно, реализацию инвестиционно-строительных проектов обеспечивает совместная работа группы предприятий-участников, каждый из которых выполняет определенные функции. К участникам ИСП относятся не только заказчики, застройщики, инвесторы, генеральные подрядчики, подрядчики, архитекторы и проектировщики. Также в проектах участвуют различного рода контролирующие

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

организации, органы власти, а также эксплуатирующие организации, обеспечивающие нормальное функционирование объекта на эксплуатационной стадии и др.

Использованы данные, собранные с применением методов социологического исследования, а именно — онлайн-анкетирования. Всего опрошено 355 респондентов, являющихся представителями предприятий ИСС различных видов деятельности. Для целей исследования респонденты были разделены на группы по видам деятельности предприятий, осуществляющих схожие функции.

Выявлено, что наиболее остро дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, проявляется на предприятиях из группы проектировщиков, в органах исполнительной власти, группе исполнителей и эксплуатирующих организаций; в наименьшей — в государственных и муниципальных учреждениях ИСС. Наличие дефицита компетенций по внедряемым технологиям определяет и появление признаков сопротивления изменениям, которое зачастую связано со страхом работы с новыми технологиями (страх не справиться, внутренний протест против увеличения рабочей нагрузки и т.д.). Наибольшее сопротивление изменениям наблюдается на предприятиях всех видов деятельности среди рядовых сотрудников, однако в самой высокой степени оно характерно для представителей группы проектировщиков, в наименьшей — в группе исполнителей, но и там оно очень велико — его наличие отметили 50 % респондентов. Сопротивление изменениям отмечается также и среди руководства предприятия и менеджеров среднего звена.

В совокупности данные результаты говорят о необходимости планирования и организации процессов цифровизации и цифровой трансформации с учетом данных аспектов и научно обоснованных предложений по снижению сопротивления изменениям в таких случаях, включая информирование персонала о предстоящих изменениях, обеспечение обучения персонала, создание (или привлечение со стороны) консультационной группы экспертов по работе с новыми технологиями, а также обеспечение стимулирующей составляющей в оплате труда тех специалистов, переход которых на работу с новыми технологиями значительно увеличивает объем работ на весь период адаптации. Применение мероприятий по снижению сопротивления изменениям позволит сократить его негативные проявления и повысить эффективность процессов цифровизации и ЦТ, и постепенно уменьшить количество предприятий, в рамках которых результаты внедрения цифровых технологий не оправдывают ожиданий.

Результаты исследования могут быть полезны менеджменту и собственникам предприятий ИСС различных видов деятельности для определения основных направлений управленческих воздействий как по снижению дефицита квалифицированных кадров в области цифровых технологий, так и по сокращению сопротивления изменениям со стороны различных групп сотрудников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *De Almeida P.R., Solas M.Z., Renz A., Bühler M.M., Gerbert P., Castagnino S. et al.* Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. Geneva : World Economic Forum, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.21381.37605

2. *Adel G., Othman A.A.E., Harinarain N.* Integrated Project Delivery (IPD): An Innovative Approach for Achieving Sustainability in Construction Projects // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 195–209. DOI: 10.1007/978-3-030-97748-1_16

3. *Schamne A.N., Nagalli A., Soeiro A.A.V., da Silva Poças Martins J.P.* BIM in construction waste management: A conceptual model based on the industry foundation classes standard // Automation in Construction. 2024. Vol. 159. P. 105283. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105283

4. *Shilkina S.* BIM-technologies in solving the problems of construction waste management // Construction and Architecture. 2023. Vol. 11. Issue 1. P. 6. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-6-6

5. *Egan J.* Rethinking Construction: The Report of the Construction Task Force to the Deputy Prime Minister, John Prescott, on the Scope for Improving the Quality and Efficiency of UK Construction. London : Her Majesty's Stationery Office, Department of Trade and Industry, 1998.

6. *Miller R., Strombom D., Iammarino M., Black B.* The Commercial Real Estate Revolution: Nine Transforming Keys to Lowering Costs, Cutting Waste, and Driving Change in a Broken Industry. Hoboken, NJ : Wiley, 2009.

7. *Ashcraft H.* Transforming project delivery: integrated project delivery // Oxford Review of Economic Policy. 2022. Vol. 38. Issue 2. Pp. 369–384. DOI: 10.1093/oxrep/grac001

8. *Changali S., Mohammad A., van Nieuwland M.* The Construction Productivity Imperative // McKinsey. 2015. URL: https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-construction-productivity-imperative

9. *Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W.* Megaprojects and Risk. UK ; New York : Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/cbo9781107050891

10. *Teicholz P.* Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies. Santa Clara : AECbytes, 2004.

11. *Teicholz P.* Labor-productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look) // AECbytes. Santa Clara : AECbytes, 2013.

12. *Hashim M.Z., Harun N.A., Othman I., Hassan S.H., Musa M.K.* The Impact of Building Information Modelling (BIM) on Labor Productivity // International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 9. DOI: 10.6007/IJARBSS/v14-i9/22787

13. *Wong J., Rashidi A., Arashpour M.* Evaluating the Impact of Building Information Modeling on the Labor Productivity of Construction Projects in Malaysia // Buildings. 2020. Vol. 10. Issue 4. P. 66. DOI: 10.3390/buildings10040066

14. *Кисель Т.Н., Крылов В.В., Крылова М.В., Гриник О.Д.* Реструктуризации предприятий инвестиционно-строительной сферы с учетом ее состояния и направлений развития // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 3. С. 12. EDN CUPNVG.

15. *Krzemiński M.* Construction Team Downtime Minimization Model Including Efficiency Coefficients // Procedia Engineering. 2016. Vol. 161. Pp. 18–22. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.491

16. *De Marco A., Karzouna A.* Assessing the Benefits of the Integrated Project Delivery Method: A Survey of Expert Opinions // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 138. Pp. 823–828. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.107

17. *Jaffar N., Abdul Tharim A.H., Shuib M.N.* Factors of Conflict in Construction Industry : a Literature Review // Procedia Engineering. 2011. Vol. 20. Pp. 193–202. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.156

18. *Абашкин В.Л., Абдрахманова Г.И., Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Демидкина О.В., Демьянова А.В. и др.* Индикаторы цифровой экономики: 2024 : статистический сборник. М. : ВШЭ, 2024. 276 с.

19. *Москвичев М.А.* Цифровая трансформация строительных организаций // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 3–1. С. 294–304. DOI: 10.34670/AR.2023.90.59.067. EDN BMGRGV.

20. *Ширяев Н., Садовников Д.* Цифровая трансформация деятельности проектных и архитектурно-строительных организаций с помощью Lotsia PDM PLUS // САПР и графика. 2019. № 2 (268). С. 52–56. EDN SOAKSL.

21. *Булина А.Р., Солопова Н.А.* Модель оценки цифровой зрелости для промышленных предприятий строительной индустрии // E-Management. 2023. Т. 6. № 2. С. 4–13. DOI: 10.26425/2658-3445-2023-6-2-4-13. EDN QOWIKX.

22. *Прохорова Ю.С., Кисель Т.Н.* Исследование уровня цифровизации на российских предприятиях инвестиционно-строительной сферы : монография. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2023. 53 с. DOI: 10.22227/978-5-7264-3243-4.2023.53. EDN CNSCLW.

Поступила в редакцию 7 июля 2025 г.
Принята в доработанном виде 1 ноября 2025 г.
Одобрена для публикации 1 ноября 2025 г.

Об авторах: **Татьяна Николаевна Кисель** — доктор экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru;

Юлия Сергеевна Прохорова — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 818105, Scopus: 57191269642, ResearcherID: ABI-2855-2020, ORCID: 0000-0001-5542-1716; eshly.06@mail.ru;

Цзюй Чжиминь — инженер; **Китайская строительная компания «China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd»**; Китайская Народная Республика; 626437351@qq.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. De Almeida P.R., Solas M.Z., Renz A., Bühler M.M., Gerbert P., Castagnino S. et al. *Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology.* Geneva, World Economic Forum, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.21381.37605

2. Adel G., Othman A.A.E., Harinarain N. Integrated Project Delivery (IPD): An Innovative Approach for Achieving Sustainability in Construction Projects. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2023; 195-209. DOI: 10.1007/978-3-030-97748-1_16

3. Schamne A.N., Nagalli A., Soeiro A.A.V., da Silva Poças Martins J.P. BIM in construction waste management: A conceptual model based on the industry foundation classes standard. *Automation in Construction.* 2024; 159:105283. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105283

4. Shilkina S. BIM-technologies in solving the problems of construction waste management. *Construction and Architecture.* 2023; 11(1):6. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-6-6

5. Egan J. *Rethinking Construction: The Report of the Construction Task Force to the Deputy Prime Minister, John Prescott, on the Scope for Improving the Quality and Efficiency of UK Construction.* London, Her Majesty's Stationery Office, Department of Trade and Industry, 1998.

6. Miller R., Strombom D., Iammarino M., Black B. *The Commercial Real Estate Revolution: Nine Transforming Keys to Lowering Costs, Cutting Waste, and Driving Change in a Broken Industry.* Hoboken, NJ, Wiley, 2009.

7. Ashcraft H. Transforming project delivery: integrated project delivery. *Oxford Review of Economic Policy.* 2022; 38(2):369-384. DOI: 10.1093/oxrep/grac001

8. Changali S., Mohammad A., van Nieuwland M. The Construction Productivity Imperative. *McKinsey.* 2015. URL: https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-construction-productivity-imperative

9. Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. *Megaprojects and Risk.* UK ; New York, Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/cbo9781107050-891

10. Teicholz P. *Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies.* Santa Clara, AECbytes, 2004.

11. Teicholz P. Labor-productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look). *AECbytes.* Santa Clara, AECbytes, 2013.

12. Hashim M.Z., Harun N.A., Othman I., Hassan S.H., Musa M.K. The Impact of Building Information Modelling (BIM) on Labor Productivity. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences.* 2024; 14(9). DOI: 10.6007/IJARBSS/v14-i9/22787

13. Wong J., Rashidi A., Arashpour M. Evaluating the Impact of Building Information Modeling on the Labor Productivity of Construction Projects in Malaysia. *Buildings.* 2020; 10(4):66. DOI: 10.3390/buildings10040066

14. Kisel T.N., Krylov V.V., Krylova M.V., Grinik O.D. Restructuring enterprises in the investment and construction sector, considering its condition and directions of development. *The Eurasian Scientific Journal.* 2024; 16(3):12. EDN CUPNVG. (rus.).

15. Krzemiński M. Construction Team Downtime Minimization Model Including Efficiency Coefficients. *Procedia Engineering.* 2016; 161:18-22. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.491

16. De Marco A., Karzouna A. Assessing the Benefits of the Integrated Project Delivery Method: A Survey of Expert Opinions. *Procedia Computer Science.* 2018; 138:823-828. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.107

17. Jaffar N., Abdul Tharim A.H., Shuib M.N. Factors of Conflict in Construction Industry : a Literature Review. *Procedia Engineering.* 2011; 20:193-202. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.156

18. Abashkin V.L., Abdrakhmanova G.I., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., Demidkina O.V., Demyanova A.V. et al. *Indicators of the digital economy: 2024 : statistical collection.* Moscow, HSE, 2024; 276. (rus.).

19. Moskvichev M.A. Digital transformation of construction organizations. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow.* 2023; 13(3-1):294-304. DOI: 10.34670/AR.2023.90.59.067. EDN BMGRGV. (rus.).

20. Shiryaev N., Sadovnikov D. Digital transformation of the activities of design and architectural construction organizations using Lotsia PDM PLUS. *CAD and Graphics.* 2019; 2(268):52-56. EDN SOAKSL. (rus.).

21. Bulina A.R., Solopova N.A. Maturity model for assessing digitalization process of construction industry companies. *E-Management.* 2023; 6(2):4-13. DOI: 10.26425/2658-3445-2023-6-2-4-13. EDN QOWIKX. (rus.).

22. Prokhorova Yu.S., Kisel T.N. *A study of the level of digitalization in Russian enterprises of the investment and construction sector.* Moscow, MISI – MGSU Publishing House, 2023; 53. DOI: 10.22227/978-5-7264-3243-4.2023.53. EDN CNSCLW. (rus.).

Received July 7, 2025.
Adopted in revised form on November 1, 2025.
Approved for publication on November 1, 2025.

BIONOTES: **Tatiana N. Kisel** — doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru;

Yulia S. Prokhorova — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**;

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 818105, Scopus: 57191269642, ResearcherID: ABI-2855-2020, ORCID: 0000-0001-5542-1716; eshly.06@mail.ru;

Ju Zhimin — engineer; **Chinese construction company "China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd"**; Republic of China; 626437351@qq.com.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 334.7
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1806-1816

Структурирование продуктового портфеля кампуса в условиях достижения конкурентоспособности

Наталья Григорьевна Верстина, Ольга Олеговна Донская
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В контексте реализации федерального проекта «Создание сети современных кампусов» актуальной задачей становится формирование конкурентоспособного продуктового портфеля, обеспечивающего эффективность функционирования кампусов на национальном, региональном и институциональном уровнях. В настоящее время запущен пилотный проект по разработке продуктовых программ кампусов, согласно которому каждый элемент кампуса рассматривается как часть единого целостного продукта, который должен удовлетворять потребности различных целевых групп потребителей. Цель исследования — разработка научно обоснованного понятия «продукт кампуса», опираясь на научную концепцию цепочки создания стоимости, с последующим определением подхода к структурированию конкурентоспособного продуктового портфеля кампуса, одинаково релевантного национальным приоритетам, социально-экономическим вызовам региона, стратегическим планам образовательной организации высшего образования, потребительскому рынку и экономическим задачам.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе нормативных документов федерального проекта «Создание сети современных кампусов» и методических рекомендаций по разработке продуктовых программ кампусов, а также на научных работах по вопросам портфельного управления, теории создания ценности и маркетинга продукта. В качестве методов применены структурно-логический и сравнительный анализ, концептуальное моделирование, экспертно-аналитическая классификация факторов. Такой методологический подход позволил разработать положения по формированию структуры продуктового портфеля кампуса, основанной на согласовании стратегических целей, пользовательской ценности, ресурсных возможностей и экономических условий.

Результаты. Разработан процесс управления портфельной ценностью, интегрирующий принципы портфельного управления и управления взаимоотношениями с клиентами. Предложен обоснованный набор факторов для проведения анализа в процессе структурирования продуктового портфеля в условиях достижения его конкурентоспособности. Введено понятие и определена структура сбалансированного продуктового портфеля, характеризующая взаимосвязанный набор продуктов для создания единой потребительской ценности, которая является основой для достижения конкурентоспособности.

Выводы. Сбалансированный продуктовый портфель кампуса — важнейший фактор достижения комплекса эффектов от реализации этого проекта в условиях достижения его конкурентоспособности. Продуктовый портфель становится конкурентоспособным, когда представляет собой не столько набор результатов деятельности, сколько взаимосвязанную систему продуктов, каждый из которых включает совокупность ожидаемых клиентом результатов, а также цепочки и способы их создания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кампус, продуктовый портфель, портфельное управление, цепочка создания стоимости, продукт, конкурентоспособность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Верстина Н.Г., Донская О.О.* Структурирование продуктового портфеля кампуса в условиях достижения конкурентоспособности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1806–1816. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1806-1816

Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Донская, o.donskaya@gmail.com.

Structuring the campus product portfolio for competitive performance

Natalia G. Verstina, Olga O. Donskaya
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Within the framework of the federal project “Creation of a Network of Modern Campuses” a key strategic challenge is the development of a competitive product portfolio that ensures the effective functioning of campuses at national, regional, and institutional levels. A pilot initiative on developing campus product programmes has been launched, positioning each campus component as part of an integrated product system designed to meet the needs of diverse user groups. The purpose of this study is to formulate a scientifically grounded definition of the “campus product”, drawing on the aca-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

© Н.Г. Верстина, О.О. Донская, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

demic concept of the value chain, and to develop an approach to structuring a competitive campus product portfolio aligned with national priorities, regional socio-economic challenges, institutional strategies, market demand, and economic performance requirements.
Materials and methods. The study is based on an analysis of regulatory documents of the federal campus project and methodological guidelines for designing campus product programmes, as well as academic works on portfolio management, value creation theory, and product marketing. The methodological framework integrates structural–logical and comparative analysis, conceptual modelling, and expert-analytical factor classification. This combination allows for the formulation of principles for developing the structure of a campus product portfolio grounded in the alignment of strategic objectives, user value, resource capabilities, and economic conditions.
Results. The research introduces a process of portfolio value management that integrates the principles of project portfolio management (PPM) with those of customer relationship management (CRM). A substantiated set of factors is proposed for analytical assessment in structuring the product portfolio under conditions of achieving competitiveness. The study formulates the concept and defines the structure of a balanced product portfolio understood as an interconnected system of products jointly generating a unified consumer value that underpins competitiveness.
Conclusions. A balanced campus product portfolio is a critical determinant for achieving the intended effects of this project under conditions of competitiveness. The product portfolio becomes competitive not when it represents a collection of discrete outputs, but when it forms an integrated system in which each product comprises a set of expected user outcomes as well as the chains and mechanisms through which these outcomes are created.

KEYWORDS: campus, product portfolio, portfolio management, value chain, product, competitiveness

FOR CITATION: Verstina N.G., Donskaya O.O. Structuring the campus product portfolio for competitive performance. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1806-1816. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1806-1816 (rus.).

Corresponding author: Olga O. Donskaya, o.donskaya@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации запущен федеральный проект «Создание сети современных кампусов», согласно которому до 2036 г. в стране должно быть создано 40 студенческих кампусов мирового уровня[1]. Существенной особенностью данного федерального проекта является применение *механизма государственно-частного партнерства* (ГЧП) в части создания и управления новой инфраструктурой, зафиксированного в Постановлении Правительства Российской Федерации от 28.07.2021 № 1268 «О реализации проекта по созданию инновационной образовательной среды (кампусов) с применением механизмов государственно-частного партнерства и концессионных соглашений в рамках федерального проекта “Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров” национального проекта “Наука и университеты”». Государственно-частное партнерство рассматривается не только как инструмент привлечения внебюджетных инвестиций в создание инфраструктуры, но и предполагает активное участие частного партнера в управлении на этапе эксплуатации.

Реализация федерального проекта предполагает достижение *социально-экономических эффектов и аналитических показателей одновременно на национальном, региональном и институциональном уровнях*, охватывая такие области оценки, как влияние деятельности образовательной организации высшего образования (ООВО) на экономическое развитие региона, количество высокопроизводительных рабочих мест, количество и качество студентов, уровень индустриальных партнерств и сетевого взаимодействия, приток иностранных студентов и другие показатели[2]. Приоритетным направлением аналитических показателей, оценивающих эффекты от создания и функционирования кампуса, служит оценка его влияния на научно-технологическое развитие страны и региона, что оценивается долей продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовой региональный продукт региона; количеством отечественных технологий, используемых организациями реального сектора экономики; числом субъектов малого и среднего предпринимательства в сфере технологического предпринимательства; количеством патентов на изобретения в мире.

С целью прогнозирования достижения вышеперечисленных эффектов Минобрнауки запустило пилотный проект по разработке продуктовых программ кампусов с помощью продуктового подхода, согласно которому кампус рассматривается как единый целостный продукт, удовлетворяющий потребности разных целевых групп пользователей и способствующий региональному развитию и достижению параметров конкурентоспособности[3]. Создание продуктовых программ кампусов на эта-

[1] Создание сети современных кампусов. URL: https://национальныепроекты.рф/new-projects/molodezh-i-deti/sozdanie-seti-sovremennyh-kampusov/

[2] Приложения № 36–46 к Распоряжению Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 237-р. URL: https://minobrnauki.gov.ru/upload/2023/06/237-%D1%80%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%2036-46_.pdf

[3] Минобрнауки России запустило пилотный проект по разработке продуктовых программ кампусов. URL: https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/90684/

пе строительства также содействует своевременному планированию затрат и результатов на этапе реализации проекта. Обозначенный продуктовый подход рассматривает кампус в качестве многофункциональной среды, где базовый образовательный процесс интегрируется с исследовательской, инновационной, производственной и культурной деятельностью. Такая функциональная интеграция создает основу для возникновения *новых форматов деятельности на территории кампуса и новых форм взаимодействия ООВО кампуса с городом* — его экономикой, социальной, культурной сферами и градостроительными аспектами [1].

Методические рекомендации по разработке продуктов и продуктовых программ кампуса формируют единое представление об основных понятиях, принципах, порядке разработки, а также методик расчетов показателей продуктовых программ и портфеля кампуса с включением проведения обязательной экспертной оценки. Согласно методическим рекомендациям, *портфель продуктовых программ кампусов* представляет собой комплекс стратегических документов долгосрочного действия, направленных на обеспечение устойчивого функционирования кампуса. Ключевым элементом портфеля является *продуктовая программа*, которая определяется как совокупность взаимосвязанных проектов по созданию и коммерциализации новых научных, образовательных, технологических продуктов, реализуемых на базе инфраструктуры кампусов, и оказывающих значимое влияние на социально-экономическое и научно-технологическое развитие страны и регионов. Основой таких программ выступает *продукт кампуса* — результат деятельности, осуществляемой в кампусе, обладает стоимостью, потребительской ценностью и конкурентными преимуществами. Критическим условием реализации продукта является наличие заказчиков, готовых выполнять финансирование разработок или оплату услуг.

В результате анализа методических рекомендаций по разработке продуктов и продуктовых программ кампуса выявлена необходимость дальнейшей проработки научного подхода к понятию «продукт кампуса», опираясь на концепцию цепочки создания стоимости (value chain) с последующим определением методологии структурирования продуктового портфеля кампуса, одинаково релевантного национальным приоритетам научно-технологического развития страны, социально-экономическим вызовам региона, стратегическим планам ООВО кампуса, потребительскому рынку и экономическим задачам по формированию источников получения доходов от реализации портфеля в условиях достижения конкурентоспособности.

Таким образом, цель статьи заключается в разработке подхода к определению структуры продуктового портфеля кампуса с позиции баланса стратегических, экономических, научно-технологических и социальных эффектов, а научная новизна — в обосновании решающего влияния процесса анализа и установления структуры продуктового портфеля на достижение целевых эффектов федерального проекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы исследования включают нормативно-правовые акты федерального проекта «Создание сети современных кампусов», положения Постановления Правительства РФ № 1268 и методические рекомендации Министерства науки и высшего образования по разработке продуктовых программ кампусов. Эти документы были использованы для анализа официальных подходов к определению продукта кампуса, его роли в достижении социально-экономических и научно-технологических эффектов, а также для изучения принципов, заложенных в пилотный проект Минобрнауки по созданию продуктовых программ. Дополнительную эмпирическую основу составили научные работы, посвященные управлению кампусами и продуктовой логике в образовательной среде.

Методологическая база опирается на классические представления о продукте как экономической категории, восходящие к маркетинговой школе Ф. Котлера, где продукт трактуется как результат труда, обладающий рыночной ценностью и направленный на удовлетворение потребностей пользователей. Для анализа структурирования продуктового портфеля применен подход А. Остервальдера и И. Пинье, рассматривающий продукт через призму бизнес-модели и взаимосвязанных блоков создания ценности. Современные трактовки продуктового подхода в управленческих исследованиях (например, работы Д.В. Кутявина) использованы для уточнения логики формирования ценности в образовательных и научных продуктах.

Методы исследования включают структурно-логический анализ нормативных документов, сравнительный анализ теоретических подходов к управлению портфелями (R.G. Cooper, S.J. Edgett, E.J. Kleinschmidt), а также изучение принципов конкурентоспособности продукта и факторов его ценности на различных стадиях жизненного цикла (ЖЦ). Для выявления связи между процессами создания потребительской ценности и управлением портфелем применены положения работ по совместному созданию ценности в сложных системах и отечественные исследования по управлению продуктовыми портфелями. Методика группировки факторов опиралась на современные представления о зрелости систем управления портфелями проектов, отраженные в монографии В.М. Аньшина и О.Н. Ильиной.

Использование указанных материалов и методов позволило обосновать подход, в котором

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

структурирование продуктового портфеля кампуса рассматривается как процесс согласования стратегических, ресурсных, инфраструктурных и экономических условий с запросами целевых групп пользователей. Такой методологический конструкт обеспечивает комплексное понимание механизма формирования продуктовой ценности кампуса и создает основу для дальнейшего анализа способов достижения целевых эффектов федерального проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Продуктовый подход представляет собой управление, которое сосредоточено на создании и развитии продуктов, ориентированных на удовлетворение потребностей клиентов и достижение стратегических целей организации. Продуктовый подход применительно к управлению кампусами — это *способ реализации* образовательной, научно-исследовательской, инновационной деятельности таким образом, чтобы максимально эффективно удовлетворить требования, потребности и ожидания всех категорий потребителей [2]. Применение продуктового подхода в управлении кампусом потребует изменения в определении продукта, который сейчас определяется как результат деятельности в кампусе, обладающий потребительской ценностью.

Анализ научных подходов предлагает различное определение «продукта» в концепции портфельного управления. Первоначальное понятие «продукт» как экономическая категория закладывается в теории маркетинга, предложенной Ф. Котлером, согласно которой под продуктом понимается результат труда, обладающий потенциальной рыночной стоимостью и предназначенный для предложения на рынке с целью удовлетворения определенных потребностей [3]. Продукт может существовать в материальной и нематериальной форме, а также представлять собой комплексные решения. С течением времени такая трактовка продукта стала недостаточной с точки зрения управления процессом создания его конкурентоспособных характеристик. А. Остервальдер и И. Пинье предложили новый подход, сместив акцент с определения продукта на его бизнес-модель, которая включает взаимосвязанные блоки: ценностное предложение, отношения с заказчиком, каналы поставки, потребительские сегменты, ключевые активности, ресурсы, партнеры, структура затрат, источники доходов [4]. Современное понятие продукта расширилось до комплексной системы взаимосвязанных элементов, формирующих его конкурентоспособность. Подход, в основе которого находится процесс бизнес-моделирования, позволил рассматривать продукт как комплекс бизнес-процессов, в каждом из которых возникает потребительская ценность. Таким образом, продукт кампуса — это совокупность ожидаемых клиентом результатов, а также цепочки и способы их создания. То есть то, что мы производим — изделие, услуга, информация, с помощью чего мы это делаем (люди, оборудование, информационные каналы) и каким образом (сервис и процесс) [5]. Данная совокупность элементов при правильном восприятии продукта кампуса отличает его от проекта кампуса и предполагает переход от проектного управления, в рамках которого определяются наиболее эффективные методы реализации каждого отдельного проекта, к портфельному управлению (PPM), где приоритет смещается в сторону выбора правильных проектов для достижения конкурентоспособности продуктового портфеля, расставляя приоритеты и распределяя ресурсы между прямыми участниками управления кампусом (рис. 1).

Таким образом, происходит переход от бизнес-моделей, основанных на продуктах, к бизнес-моделям, базирующимся на интегрированных предложениях продуктов и услуг, которые обеспечивают ценность, меняют процесс портфельного управления. Управление продуктовым портфелем кампуса опи-

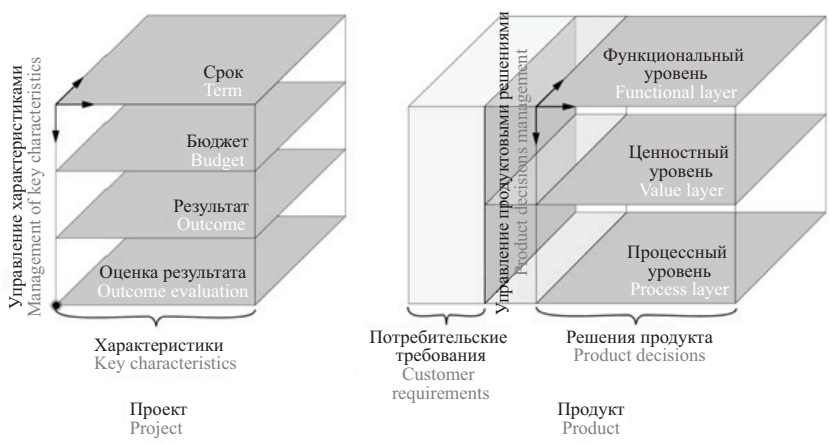


Рис. 1. Отличие проекта кампуса от продукта кампуса для целей структурирования продуктового портфеля

Fig. 1. Differentiating the Campus Project from the Campus Product for the Purposes of Structuring the Product Portfolio

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

рается на *концепцию project portfolio management (PPM)* и представляет собой процесс принятия стратегических решений относительно определения приоритетных направлений, структуры, состава, ресурсов и стратегии развития продуктового портфеля кампуса [6].

Цепочка создания ценности в портфельном управлении — это модель создания продукта, в наибольшей степени удовлетворяющего потребности клиента, что заключается в формировании идеи продукта, его предназначения, эргономики, эстетики, ощущения уникальности, социальной и эмоциональной привлекательности [7]. Взаимосвязь ценности и стоимости продукта находит свое выражение в его конкурентоспособности. Потребительская ценность и коммерческий успех продукта существуют в прямой зависимости — чем выше воспринимаемая ценность и ниже совокупные затраты на создание продукта по всей цепочке создания потребительской ценности, тем выше вероятность успешной рыночной реализации. Согласно определению А.А. Бушуевой, конкурентоспособность продукта является «сочетанием его потребительной стоимости (потребительская полезность) и стоимости потребления (цена потребления, включающая в себя цену покупки в комплексе с эксплуатационными и другими текущими расходами, осуществляемыми в течение срока службы продукта)» [8].

Объединение этапов портфельного управления и процесса создания потребительской ценности с применением концепции управления взаимоотношений с клиентом (CRM) [9] формирует новый подход к портфельному управлению, который можно определить как *управление портфельной ценностью*. Согласно данному подходу, управление продуктовым портфелем и цепочкой создания ценности представляет собой два параллельных процесса, взаимосвязанных между собой единой информационной системой, где результат каждого этапа управления — *PPM* и *CRM* — влияет на принятие управленческих решений на последующих этапах (рис. 2).

На первом этапе устанавливается *стратегия кампуса* — роль кампуса в реализации стратегии ООВО. В стратегии содержится стратегический выбор потребительских рынков, их сегментация и приоритизация. На втором этапе *структурируется портфель* путем анализа набора факторов, а также *определяются продукты* в каждой группе портфеля. На этом этапе также идентифицируется запрос потребителя или верифицируется гипотеза по востребованности продукта. На третьем этапе определяется *продуктовая ценность и процесс ее создания*. Производится расчет необходимых ресурсов на разработку продукта и формирование потребительской ценности. На четвертом этапе происходит *перераспределение всех типов ресурсов* внутри продуктового портфеля кампуса: финансовых, кадровых, технологических и других. Результатом является формирование операционного бюджета реализации продуктов портфеля, в котором определяются объемы финансирования, источники финансирования, план рекрутинга персонала, маркетинговый план. На пятом этапе *определяются каналы сбыта* и оказания сервиса потребителю. Каналы сбыта распределяются по продуктам всего портфеля и оптимизируются по точкам пересечения с другими продуктами. На следующем этапе при построении модели управления происходит поиск *взаимосвязей функций между продуктами* с целью оптимизации организационной структуры и бюджета на ее обслуживание. Важнейший этап — *формирование информационной системы* сбора, обработки и правил интерпретации метрик эффективности реализации продуктового портфеля кампуса. На основе данных принимаются управленческие решения об изменении портфеля и перераспределении ресурсов. На заключительном этапе *настраивается система обратной связи*. Оценка полученной обратной связи в процессе коммуникации с потребителем используется для определения успешности продукта в процессе получения ценности.

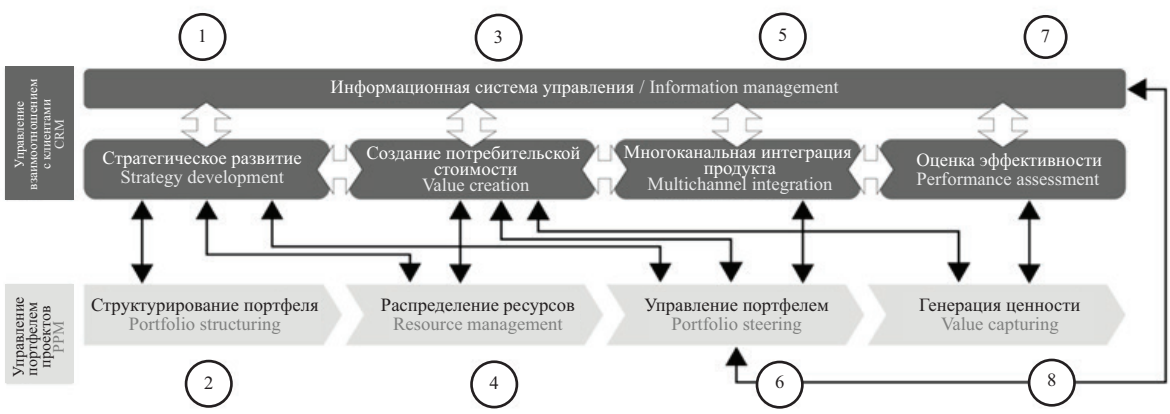


Рис. 2. Процесс портфельного управления с применением концепции управления взаимоотношений с клиентом (CRM) [10]

Fig. 2. The Portfolio Management Process Incorporating the Customer Relationship Management (CRM) Concept [10]

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Факторы определения структуры и состава продуктового портфеля

Factors Determining the Structure and Composition of the Product Portfolio

Наименование группы факторов Factor Group	Результат оценки Assessment Outcome	Определение факторов Factor Definition
Стратегическая миссия Strategic Mission	Определяют долгосрочные цели и ценности кампуса, приоритетные направления развития Determine the long-term goals and values of the campus and define its priority development directions	Цели государственных программ и национальных проектов. Стратегия социально-экономического развития региона. Специализация образовательных и научных программ ООВО в соответствии с отраслевой структурой экономики региона. Стратегические цели индустриальных партнеров и работодателей. Государственные программы и национальные проекты Goals of state programmes and national projects. Regional socio-economic development strategy. Specialisation of the HEI's educational and research programmes in line with the regional economic structure. Strategic goals of industrial partners and employers. State programmes and national projects
Пользовательская ценность User Value	Определяют емкость целевых групп пользователей и характер их запроса Determine the size of target user groups and the nature of their demand	Рейтинг и репутация ООВО. Характер и разнообразие целевых групп пользователей. Объем спроса целевых групп пользователей. Уровень платежеспособности целевых групп пользователей. Специфика потребностей целевых групп пользователей HEI ranking and reputation. Characteristics and diversity of target user groups. Demand volume of target user groups. Purchasing power of target user groups. Specific needs of target user groups
Ресурсные возможности Resource Capabilities	Определяют наличие интеллектуальных, кадровых, финансовых ресурсов и рыночных возможностей Determine the availability of intellectual, human, financial and market resources	Количество ООВО, осуществляющих деятельность в кампусе. Комплиментарность специализаций ООВО кампуса. Количество и качество ППС и научных сотрудников. Объем и характер сетевого сотрудничества. Структура и объемы финансирования. Наличие и характер индустриальных партнеров и работодателей Number of HEI's operating within the campus. Complementarity of HEI specializations; number and quality of academic and research staff. Scale and nature of network cooperation. Structure and volume of available funding. Availability and profile of industrial partners and employers
Инфраструктурные возможности Infrastructure Capabilities	Определяют функциональную и материально-техническую базу кампуса Define the functional and material–technical foundation of the campus	Месторасположение кампуса. Логистические возможности локации. Степень открытости кампуса и окружающей среды. Технико-экономические показатели кампуса по типам. Разнообразие функционала пространств кампуса Campus location. Logistical capabilities of the site. Degree of openness of the campus and its surrounding environment. Technical and economic parameters (TEP) of the campus. Diversity of campus spatial functions

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

Окончание табл. / End of the Table

Наименование группы факторов Factor Group	Результат оценки Assessment Outcome	Определение факторов Factor Definition
Экономическая выгода Economic Benefit	Определяют рентабельность и финансовую устойчивость Determine profitability and financial sustainability	Объем и тип инфраструктуры, формирующей доход. Объем и уровень конкуренции. Показатели финансово-экономической модели кампуса. Распределение рисков между публичным и частным партнером в механизме ГЧП. Наличие в структуре управления узко квалифицированных операторов Volume and type of revenue-generating infrastructure. Extent and intensity of competition. Indicators of the campus financial–economic model. Risk allocation between public and private partners within the PPP mechanism. Presence of highly specialized operators within the management structure

Управление портфелем связано с критически важным вопросом балансировки доступных ресурсов с количеством продуктов [11]. Перенасыщение портфеля при ограниченных доступных ресурсах приводит к увеличению времени цикла, низкому качеству исполнения и неэффективным новым продуктам. Для достижения конкурентоспособности продуктового портфеля с учетом его функционирования на открытом рынке продуктовый портфель кампуса должен быть сбалансированным и адаптивным.

В результате исследуемых подходов (ресурсная теория фирмы Дж. Барни, стейкхолдерский подход Э. Фримена, концепция динамических способностей Д. Тиси, теории «тройной спирали» Г. Ицковица, Л. Лейдесдорфа, концепции жизненного цикла Д. Гарднера) сбалансированный портфель обладает следующими свойствами [12]:

- *сбалансированностью по различным параметрам*: степени риска, продолжительности ЖЦ продуктов, технологическим и рыночным аспектам;
- *стратегической ориентацией*, обусловленной системным соответствием продуктов, составляющих портфель, стратегическим целям реализации проекта кампуса у всех участников управления;
- *максимизацией ценности* у всех целевых групп пользователей, которая способствует своевременному достижению целей долгосрочной финансовой окупаемости проекта;
- *рациональностью распределения ресурсов* в соответствии с емкостью спроса на продукты;
- сбалансированностью по продолжительности и *стадии жизненного цикла продуктов*.

Формирование групп факторов для структурирования продуктового портфеля обусловлено необходимостью обеспечить баланс между стратегическими целями участников управления кампусом, потребительской востребованностью продуктов и сервисов и экономической устойчивостью операционной финансово-экономической модели кампуса [13]. В результате автором было сформировано пять групп факторов, оказывающих комплексное воздействие на формирование продуктового портфеля кампуса для достижения его конкурентоспособности (табл.).

Факторы стратегической миссии являются определяющей группой, формирующей долгосрочные приоритеты развития ООВО, обеспечивают согласованность всех продуктов портфеля с институциональными целями федерального проекта, формируют уникальный образовательный, научный и культурный профиль кампуса, а также позволяют продуктовому портфелю дифференцироваться на рынке услуг. Показатели пользовательской ценности критически важны, так как определяют востребованность продуктов у целевых групп пользователей, обеспечивают конкурентоспособность продуктового портфеля в условиях наличия конкурентного рынка, формируют долгосрочную лояльность и позволяют адаптировать продуктовый портфель к изменяющимся запросам целевых групп пользователей. Факторы ресурсных возможностей имеют ограничивающий характер, определяют реалистичность выполнения заявленных стратегических целей, ограничивают масштабы расширения портфеля, влияют на качество реализации продуктов и сервисов, а также требуют отдельной управленческой деятельности, касающейся разработки и реализации программ получения дополнительной доходности. Показатели инфраструктурных возможностей имеют обеспечивающий характер, непосредственно влияют на качество реализации продуктового портфеля, определяют возможности диверсификации деятельности, осуществляемой в кампусе, и внедрения инновационных стандартов, создают конкурентные преимущества в привлечении целевых групп пользователей. Факторы экономической выгоды представляют собой финансовый регулятор, обеспечивают долгосрочную устойчивость финансово-экономической модели кампуса, позволяют оценить эффективность использования ресур-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Рис. 3. Структура сбалансированного продуктового портфеля кампуса

Fig. 3. Structure of a balanced campus product portfolio

сов, расставлять приоритеты при выборе продуктов, определяют возможности сокращения инвестиционного цикла, балансируют институциональные, социально-экономические и коммерческие цели.

В результате анализа данных факторов формируется *сбалансированная структура продуктового портфеля*, сочетающая стратегическую и финансовую ориентацию, перспективное развитие и социальную ответственность, создавая условия и предпосылки для достижения конкурентоспособности кампуса (рис. 3).

Стратегическое ядро продуктового портфеля представляет собой фундаментальные продукты, определяющие стратегию кампуса в соответствии со стратегией ООВО и национальными приоритетами научно-технологического развития. Данный тип продуктов обладает долгосрочным характером, их финансирование осуществляется государственным заданием. Основная задача этих продуктов — обеспечение конкурентоспособности и стратегического превосходства ООВО в приоритетных отраслях. *Коммерчески перспективные продукты* ориентированы на рыночный спрос и формирование внебюджетного дохода. Они запускаются под идентифицированный потребительский запрос и заказ или совместно с индустриальными партнерами и заказчиками. Указанный тип продуктов может обладать как долгосрочным, так и среднесрочным сроком реализации. Изменение этой продуктовой группы происходит под влиянием рыночных факторов, в соответствии с чем данные продукты должны быть адаптивны к изменению внешних факторов. *Инновационная группа* представляет собой совокупность экспериментальных продуктов, которые обладают коротким циклом запуска и тестирования. Реализуются под запрос индустрий или прямого потребительского спроса. В результате эффективного тестирования имеют потенциал стать коммерчески перспективными и в отдельных случаях стратегическим ядром [14]. *Социально-культурная* группа продуктов преобразует кампус в открытый центр городского развития, создает условия для партнерства, интеграции городской повестки и формирует узнаваемость места. Данные продукты не характеризуются прямой коммерческой выгодой, они критически важны для формирования привлекательной среды, интенсивности коммуникаций и выступают частью маркетинговой и сервисной программы.

Эта структура продуктового портфеля характеризуется синергией — коммерческие продукты финансируют инновации, социальные продукты создают лояльность пользователей для стратегического ядра, инновационные служат источником новых долгосрочных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленное исследование демонстрирует, что формирование сбалансированного продуктового портфеля является важнейшим фактором достижения комплекса эффектов от реализации федерального проекта «Создание сети современных кампусов» в условиях достижения его конкурентоспособности. Уточненное понятие «продукта» с точки зрения создания полноценной цепочки потребительской ценности формирует новый взгляд на деятельность ООВО в процессе реализации и управления проектами с ориентацией на финансового заказчика. Разработанный подход, интегрирующий принципы портфельного управления и управления взаимоотношениями с клиентами, позволяет преодолеть разрыв в целеполагании между стратегическими целями научно-технологического развития страны, программой развития ООВО и потребностями конечных пользователей.

Перспективой развития рассматриваемой исследовательской темы становится последующий процесс выбора продуктов и наполнения продуктового портфеля, который является инструментом *стратегического выравнивания*, обеспечивающего направление ключевых ресурсов на реализацию тех продуктов и сервисов, которые развивают стратегический потенциал кампуса и создают потребительскую ценность в долгосрочной перспективе. Согласно современной *портфельной теории Г. Марковица*, эффективный портфель должен достигать оптимального баланса между высокорисковыми инициативами с потенциалом значительной отдачи и менее рискованными продуктами, обеспечивающими стабильный эффект [15]. Портфельную теорию дополняет *ресурсная теория Дж. Барни*, согласно которой конкурентное преимущество формируется за счет обладания уникальными, ценными, редкими и не воспроизводимыми стратегическими ресурсами и компетенциями [16]. Опираясь на вышеизложенные положения, разрабатываемое наполнение продуктового портфеля должно обладать следующими свойствами:

- *ресурсно-ориентированность* — ядро продуктов должно опираться и развивать ключевые компетенции прямых участников управления и формировать долгосрочные конкурентные преимущества;
- *стратегическая сбалансированность* — портфель должен сочетать продукты с разным уровнем доходности и риска, основываясь на портрете и потребностях всех целевых групп пользователей;
- *сфокусированность на создании ценности* — продукты в портфеле должны быть направлены на создание дополнительной стоимости, отражающейся в объеме пользования и уровне доходов [17].

Таким образом, продуктовый портфель кампуса становится по-настоящему конкурентоспособным, когда представляет собой не столько набор результатов деятельности ООВО кампуса, сколько *взаимосвязанную систему продуктов*, каждый из которых включает совокупность ожидаемых клиентом результатов, а также цепочки и способы их создания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Смолина Е.Ю.* Кампусный проект как инструмент управления // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики. 2022. С. 226–227. EDN VKOZOM.

2. *Пятыжкин С.С.* Продуктовый подход в российских компаниях // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № S6. EDN XVDNJX.

3. *Котлер Ф., Келлер Л.* Маркетинг менеджмент. СПб. : Питер, 2020. 848 с.

4. *Остервальдер А., Пинье И.* Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора. М. : Альпина Паблишер, 2022. 288 с.

5. *Кутявин Д.В.* Продуктовый подход к формированию человеческого капитала предпринимательских организаций // Управленческие науки. 2023. Т. 13. № 2. С. 81–95. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-2-81-95. EDN FWMQCZ.

6. *Cooper R.G., Edgett S.J., Kleinschmidt E.J.* New Product Portfolio Management: Practices and Performance // Journal of Product Innovation Management. 1999. Vol. 16. Issue 4. Pp. 333–351. DOI: 10.1111/1540-5885.1640333

7. *Гринцевич Л.В.* Управление конкурентоспособностью продукта на этапах жизненного цикла // Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление. 2023. № 2 (274). С. 84–94. DOI: 10.52065/2520-6877-2023-274-2-12. EDN IMPTQP.

8. *Бушуева А.А.* Анализ факторов, влияющих на конкурентоспособность продукта организации // Вестник экспертного совета. 2021. № 2 (25). С. 95–100. EDN PJFGYX.

9. *Kohtamäki M., Rajala R.* Theory and practice of value co-creation in B2B systems // Industrial Marketing Management. 2016. Vol. 56. Pp. 4–13. DOI: 10.1016/j.indmarman.2016.05.027

10. *Duckstein M., van Vorst J.* An Exploratory Method for Integrating Customer Experience into Product Portfolio Strategy. Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management, 2020. Pp. 14–16.

11. *Cooper R.G., Edgett S.J., Kleinschmidt E.J.* New Product Portfolio Management. MA : Perseus Books, 1998.

12. *Быстрова О.Ю., Чубраева А.П.* Разработка и управление продуктовым портфелем организации // Актуальные исследования. 2021. № 36 (63). С. 59–63. EDN LVOTBW.

13. *Аньшин В.М., Ильина О.Н.* Исследование методологии оценки и анализ зрелости управления портфелями проектов в российских компаниях : монография. М. : ИНФРА-М, 2014. 200 с. EDN UFGBLB.

14. *Liu G., Wang W.* How entrepreneurial orientation influences project portfolio success: The roles of ideation portfolio management and firm size // International Journal of Project Management. 2025. Vol. 43. Issue 4. P. 102722. DOI: 10.1016/j.ijproman.2025.102722

15. *Катаргин Н.В.* О целесообразности минимизации риска // Теоретическая экономика. 2023. № 9 (105). С. 40–53. EDN OVKAHY.

16. *Прибылов В.П.* Стратегические ресурсы организации: сущность и классификация в условиях цифровой экономики // Экономика, предпринимательство и право. 2025. Т. 15. № 3. С. 1475–1486. DOI: 10.18334/epp.15.3.122721. EDN HQZFTW.

17. *Смирнов В.Д.* О цепочке создания стоимости в банковском деле // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16. № 1. С. 77–86. DOI: 10.26794/1999-849x-2023-16-1-77-86. EDN YBGMLX.

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.
Принята в доработанном виде 15 ноября 2025 г.
Одобрена для публикации 18 ноября 2025 г.

Об авторах: **Наталья Григорьевна Верстина** — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

Ольга Олеговна Донская — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Smolina E.Yu. Campus project as a management tool. *Current issues in aviation and cosmonautics : collection of materials of the VIII International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day.* 2022; 226-227. EDN VKOZOM. (rus.).

2. Pyatyzhkin S.S. Product approach in Russian companies. *The Eurasian Scientific Journal.* 2023; 15(S6). EDN XVDNJX. (rus.).

3. Kotler F., Keller L. *Marketing management.* St. Petersburg, Piter, 2020; 848. (rus.).

4. Osterwalder A., Pigneur I. *Business Model Generation : a Handbook for the Strategist and Innovator.* Moscow, Alpina Publisher, 2022; 288. (rus.).

5. Kutyavin D.V. A product-based approach to the formation of human capital in entrepreneurial organizations. *Management Sciences.* 2023; 13(2):81-95. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-2-81-95. EDN FWMQCZ. (rus.).

6. Cooper R.G., Edgett S.J., Kleinschmidt E.J. New Product Portfolio Management: Practices and Performance. *Journal of Product Innovation Management.* 1999; 16(4):333-351. DOI: 10.1111/1540-5885.1640333

7. Grintsevich L.V. Competitiveness management at the product life cycle. *Proceeedings of BSTU. Issue 5. Economics and Management.* 2023; 2(274):84-94. DOI: 10.52065/2520-6877-2023-274-2-12. EDN IMPTQP. (rus.).

8. Bushueva A. Analysis of factors affecting the competitiveness of an organization's product. *Bulletin of the Expert Council.* 2021; 2(25):95-100. EDN PJFGYX. (rus.).

9. Kohtamäki M., Rajala R. Theory and practice of value co-creation in B2B systems. *Industrial Marketing Management.* 2016; 56:4-13. DOI: 10.1016/j.indmarman.2016.05.027

10. Duckstein M., van Vorst J. *An Exploratory Method for Integrating Customer Experience into Product Portfolio Strategy.* Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management, 2020; 14-16.

11. Cooper R.G., Edgett S.J., Kleinschmidt E.J. *New Product Portfolio Management.* MA, Perseus Books, 1998.

12. Bistrova O.U., Chubraeva A.P. Theoretical approaches to the development of new products in the process of managing the organization's product portfolio. *Current Research.* 2021; 36(63):59-63. EDN LVOTBW. (rus.).

13. An´shin V., Il´ina O. *Research of methodology of an assessment and the analysis of a maturity of management of portfolios of projects in the Russian companies.* Moscow, INFRA-M, 2014; 200. EDN UFGBLB. (rus.).

14. Liu G., Wang W. How entrepreneurial orientation influences project portfolio success: The roles of ideation portfolio management and firm size. *International Journal of Project Management.* 2025; 43(4):102722. DOI: 10.1016/j.ijproman.2025.102722

15. Katargin N. On the expediency of the risk minimizing. *Theoretical Economics.* 2023; 9(105):40-53. EDN OVKAHY. (rus.).

16. Pribylov V.P. Strategic resources of the organization: nature and classification in the digital economy. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law.* 2025; 15(3):1475-1486. DOI: 10.18334/epp.15.3.122721. EDN HQZFTW. (rus.).

17. Smirnov V.D. About the value chain in banking. *Economy. Taxes. Law.* 2023; 16(1):77-86. DOI: 10.26794/1999-849x-2023-16-1-77-86. EDN YBGMLX. (rus.).

Received November 14, 2025.
Adopted in revised form on November 15, 2025.
Approved for publication on November 18, 2025.

BIONOTES: **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

Olga O. Donskaya — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы 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[1], Имя Отчество Фамилия[2]

[1] Место работы первого автора; город, страна

[2] Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

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.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен **в соответствии со стандартом IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над нею, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье
Figure 1. Example of article image
Табл. 1. Пример таблицы в статье
Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (*A*, *F*, *b* и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (***a***, ***b*** и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

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.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

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

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

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.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушинин 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 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.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи
Тип статьи — научная статья, обзорная статьи, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111
DOI

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[1], **Имя Отчество Фамилия**[2...]

[1] *Место работы первого автора; город, страна*

[2] *Место работы первого автора; город, страна*

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия[1], **И.О. Фамилия**[2,...] на английском языке

[1] *Место работы первого автора; город, страна* – на английском языке

[2] *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 источников 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

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 11, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 11, 2025

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, указывают, 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.

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:

Артемьева 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.

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.

Contribution of the authors: 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. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

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.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 20. Выпуск 11, 2025**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 20. Issue 11, 2025**

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |

(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

И з в е щ е н и е

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **3 822** руб. **00** коп. Сумма платы за 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)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |

(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Квитанция

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **3 822** руб. **00** коп. Сумма платы за 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.

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.

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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001
(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |
(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

(наименование платежа) Вестник МГСУ
(номер лицевого счета (код) плательщика)

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **6 880** руб. **00** коп. Сумма платы за 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)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |
(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

(наименование платежа) Вестник МГСУ
(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **6 880** руб. **00** коп. Сумма платы за 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.

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.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала http://vestnikmgsu.ru/