

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 1
2026**

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

Сквозной номер 206

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 1
2026**

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

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

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

Тематические рубрики

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

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	29.01.2026.
Подписан в свет	30.01.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,14. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 14

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Станислав Емило, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-

строительный факультет, Республика Польша

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

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{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:	29.01.2026

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszkuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Т.Б. Солтагиреев

Перспективы методологических подходов к сохранению и реставрации башенной архитектуры Чечни 11

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

П.П. Гайджуrow, Н.Г. Царитова

Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений 24

М.Г. Зерцалов, Д.А. Силантьева

Верификация результатов физического и численного моделирования системы «свая – скальный массив» . . 35

В.И. Римшин, А.Л. Кришан, М.А. Астафьева, М.А. Лихидько

Научные основы определения несущей способности трубобетонных колонн с учетом предельно допустимой деформации 44

А.Р. Туснин, И.В. Мыльников

Влияние погрешностей изготовления квадратных профилей на прочность контактного соединения колонн 54

О.А. Туснина, В.М. Туснина

Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий 67

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Н.А.Г. Насрат, М.И. Абу Махади, М.А.А. Обейд

Механические характеристики и водопоглощение сжатых грунтовых кирпичей, стабилизированных малыми дозами извести и цемента 84

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.Н. Азаров, Е.В. Сысоева, Д.К-С. Батаев

«Зеленая» крыша как инструмент экологической безопасности городских территорий 95

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Л.А. Опарина, Е.А. Барзыгин, В.А. Огурцов, Р.С. Карась

Совместное применение пакетно-узлового метода и технологий искусственного интеллекта в календарно-сетевом планировании строительных проектов. 107

Т.В. Бернюкевич, А.А. Бернюкевич, Я. Сунь

Мегаполисы как центры научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития Китая 122

А.В. Алексейцев, Н.Г. Верстина, В.В. Глазкова

Риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях жизненного цикла 135

Требования к оформлению научной статьи 145

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Tamirlan B. Soltagireev

Prospects of methodological approaches to the preservation and restoration of Chechen tower architecture 11

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

Peter P. Gaydzhurov, Nadezhda G. Tsaritova

Modelling of seismic impact on a double-contour geodesic dome taking into account the flexibility of nodal connections 24

Mikhail G. Zertsalov, Daria A. Silantyeva

Verification of the results of physical and numerical modelling of the “pile – rock mass” system 35

Vladimir I. Rimshin, Anatoly L. Krishan, Maria A. Astafieva, Mikhail A. Likhidko

Scientific basis for determining the load-bearing capacity of pipe-concrete columns, taking into account the maximum permissible deformation 44

Aleksandr R. Tusnin, Ivan V. Mylnikov

The production inaccuracies' influence of square profiles on the strength of the contact joint of columns. 54

Olga A. Tusnina, Valentina M. Tusnina

Assessment of the thermal efficiency of external vertical building enclosures 67

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Nasratullah Abdul Ghafoor Nasrat, Mohammed Ibrahim Abu Mahadi, Mahmoud Abdelsalam Aref Obeid

Mechanical performance and water absorption in compressed earth bricks stabilized with small doses of lime and cement 84

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Valery N. Azarov, Elena V. Sysoeva, Dena K.-S. Bataev

Green roof as an environmental safety tool for urban areas 95

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Lyudmila A. Oparina, Evgenii A. Barzygin, Valery A. Ogurtsov, Roman S. Karas

Combined use of the package-node method and artificial intelligence technologies in calendar-network planning of construction projects 107

Tatiana V. Bernyukevich, Alena A. Bernyukevich, Sun Yan

Megacities as centres of scientific and technical activity and innovative economic development in China 122

Anatoly V. Aleksetsev, Natalia G. Verstina, Valeriya V. Glazkova

Risk-based approach to assessment of industrial facilities within the framework of lifecycles 135

Requirements for research paper design 145

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 69.059
DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.11-23

Перспективы методологических подходов к сохранению и реставрации башенной архитектуры Чечни

Тамирлан Борисович Солтагиреев

*Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика
М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова); г. Грозный, Чеченская Республика*

АННОТАЦИЯ

Введение. Методологии башенных сооружений в научной среде уделяется незначительное внимание. Отчасти это связано с историческим контекстом и археологическими поисками таких сооружений. В существующих исследованиях можно получить представление описательного характера о башенных сооружениях Чечни, однако затруднительно извлечь комплексную техническую информацию, необходимую при сохранении и реставрации таких объектов культурного наследия (ОКН).

Материалы и методы. Исследование охватывает нормативную базу, Единый реестр объектов культурного наследия профильного ведомства и научные работы в сфере сохранения башенных сооружений, раскрывающие аспекты и подходы архитектурной характеристики башенных сооружений в техническом направлении. Используются методы сравнительно-сопоставительного анализа, синтеза, обобщения, а также формализации.

Результаты. По итогам комплексного анализа реставрационных задач, методов, технологий и видов восстановительных работ, возможных к применению относительно башенных сооружений Чечни, сформирована методология сохранения ОКН, выявлена степень ее перспективности и систематизированы методологические подходы при восстановлении башенных сооружений в зависимости от реставрационной задачи. Определены перспективные методологические подходы сохранения и реставрации башенных сооружений Чечни с учетом их текущего технического состояния.

Выводы. Методологические подходы в зависимости от реставрационных задач и технического состояния объектов могут быть использованы при сохранении и реставрации башенной архитектуры не только Чечни, но и других регионов страны. Методологические подходы учитывают критическое техническое состояние многих учтенных объектов на территории региона. Практическая ценность произведенной оценки перспективности методологических подходов состоит в высокой степени адаптируемости архитекторами при проведении восстановительных работ башенных сооружений. Предложенная методология и ее оценка позволят научному сообществу расширить виды реставрационных работ, соответствующих методам реставрации башенной архитектуры, которая по итогам исследования нуждается в особом внимании в результате оценки ее состояния как критического.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: башенное сооружение, реставрация, техническое состояние объекта, методологический подход, объект культурного наследия, архитектура, реставрационная задача, технология реставрации, конструкция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Солтагиреев Т.Б. Перспективы методологических подходов к сохранению и реставрации башенной архитектуры Чечни // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 11–23. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.11-23

Автор, ответственный за переписку: Тамирлан Борисович Солтагиреев, jnus@mail.ru.

Prospects of methodological approaches to the preservation and restoration of Chechen tower architecture

Tamirlan B. Soltagireev

*Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov;
Grozny, Chechen Republic*

ABSTRACT

Introduction. Little attention is paid to the methodology of tower structures in the scientific community. This is partly due to the historical context and the archaeological search for such structures. In existing studies, it is possible to get a descriptive idea of the tower structures of Chechnya, but it is difficult to extract comprehensive technical information necessary for the preservation and restoration of such cultural heritage sites.

Materials and methods. This study covers the regulatory framework, the Unified Register of Cultural Heritage sites of the relevant department and scientific work in the field of tower conservation, revealing aspects and approaches of architectural characteristics of tower structures in the technical direction. The methods of comparative analysis, synthesis, generalization, and formalization are used.

Results. Based on the results of a comprehensive analysis of restoration tasks, methods, technologies, and types of restoration work that can be applied to tower structures in Chechnya, a methodology for preserving cultural heritage sites has been

developed, its degree of promise has been identified, and methodological approaches that stand out as promising in restoring tower structures depending on the restoration task have been systematized. Promising methodological approaches to the preservation and restoration of Chechen tower structures have been identified, taking into account their current technical condition. **Conclusions.** Methodological approaches, depending on the restoration tasks and the technical condition of the facilities, can be used in the preservation and restoration of tower architecture not only in Chechnya, but also in other regions of the country. The promising methodological approaches take into account the critical technical condition of many registered facilities in the region. The practical value of the assessment of the prospects of methodological approaches is the high degree of adaptability of architects when carrying out restoration work on the territory of tower structures. The proposed methodology and the assessment of its prospects will allow the scientific community to expand the types of restoration work corresponding to the methods of conservation and restoration of tower architecture, which, according to the results of the study, needs special attention as a result of assessing its condition as critical.

KEYWORDS: tower structure, restoration, technical condition of the object, methodological approach, cultural heritage object, architecture, restoration task, restoration technology, construction

FOR CITATION: Soltagireev T.B. Prospects of methodological approaches to the preservation and restoration of Chechen tower architecture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):11-23. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.11-23 (rus.).

Corresponding author: Tamirlan B. Soltagireev, jnus@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение башенной архитектуры формирует интерес среди представителей научного сообщества, относящихся к разным направлениям научного познания. Исторически башенные сооружения в незначительной мере рассматриваются с архитектурной и технической сторон, отчасти по причине продолжающихся археологических работ на месте обнаружения подобных объектов. Исследования восстановленных башенных сооружений, к примеру, на территории Российской Федерации, зачастую подразумевают детальное описание объекта культурного наследия (ОКН) и их функциональности. Для архитекторов подобная информация представляет определенную важность, однако ее недостаточно при проведении восстановительных работ на объекте.

Наименее затрагиваемая тема среди научных изысканий относится к методологическим подходам реставрации и сохранения башенной архитектуры, которая является первичной для специалистов в процессе реализации реставрационных мероприятий. Тем не менее некоторые работы указывают на заслуживающую внимания информацию историко-архитектурного содержания с элементами оценки технического состояния башенных сооружений. Авторы таких публикаций — З.А. Тесаев, Д.В. Веремеев, С.Н. Баркова, Т.Ф. Шумкина, А.С. Шумилкин, Ш.А. Насуханов, Г.Н. Айдарова, Е.М. Савельев, А.И. Чигрина и др. [1–7]. Среди исследователей других стран техническая составляющая изучения историко-архитектурного наследия башенных сооружений представлена недостаточно, так как основное внимание уделяется исторической значимости башен в тесной связи с событиями, людьми или локацией. Если оценить степень заинтересованности в перспективности башенных сооружений, то следует отметить некоторое отсутствие системности сравнительного анализа идентичных типов ОКН, расположенных на разных территориях.

Раскрытие сущности методологических подходов целесообразно при проведении восстанови-

тельных работ и сохранении башенных сооружений, объединенных по каким-либо характерным признакам или одной локацией. Исследование подобного рода обладает большим потенциалом, если осуществить оценку методологических подходов восстановления и сохранения башенных сооружений, расположенных на одной территории, что создаст дальнейшие перспективные условия для обнаружения методологии осуществления реставрации башенных сооружений, расположенных на территории иных регионов.

В настоящем исследовании раскрываются перспективы методологических подходов при выполнении восстановительных работ и сохранении башенных сооружений, расположенных на территории Чечни. Научные изыскания в данном направлении отсутствуют, однако они полезны при осмыслении производимой архитектурной деятельности на территории региона.

Башенная архитектура Чечни и технические сведения, указывающие на условия окружающего природно-ландшафтного рельефа, упоминаются при анализе транспортных сетей Северо-Восточного Кавказа [8]. Такая информация в исследованиях других авторов дает возможность учесть в чертежах геолокационные условия и близлежащие искусственные сооружения. В некоторой степени оценке фасадной части башенных сооружений и сопутствующих архитектурных элементов способствуют описания петроглифов и разъяснения их смысловой нагрузки [9]. Восполнить пробелы в стилистических решениях при возведении башенных сооружений, особенно расположенных на границе Чечни с другими регионами и Грузии, позволяют исследования архитектурных сооружений с использованием кирпичной и каменной кладки [10]. Часть исследований объясняет ритуальное значение оформления фасадных сторон башен, возводимых на территории Кавказа, что предоставляет возможность при осуществлении попыток визуализации разрушенного до основания башенного сооружения на территории Чечни ориентироваться на схожие подходы народов Кавказа при

обработке камня и нанесении изображений, связанных с фамильной историей в случае принадлежности ОКН определенному роду или семье [11].

Немаловажными подсказками при планировании реставрационных работ в отношении башенных сооружений Чечни служит описание композиционных решений объектов, относящихся к сибирскому зодчеству. Башни, расположенные в регионах Сибири, как показывает практика, схожи с идентичными объектами культурного наследия Кавказа принципами реализации объемно-планировочных решений [12]. Исторические методы анализа объектов строительства, применяемые в том числе в отношении башен, могут быть использованы при оценке наиболее пригодных реставрационных методов ввиду возможности визуализации башен и близлежащих строений, окружающих исследуемый объект в исторический период, но отсутствующие в настоящее время. Применение исторического метода анализа полезно дополнением недостающей информации, включая строительные технологии и материалы, которые с большей вероятностью использовались как при строительстве башен, так и при возведении объектов иной функциональности [13].

Несмотря на отсутствие непосредственной технической информации о башенных конструкциях в трудах авторов из других стран, для процесса реставрации и сохранения объектов культурного значения Чечни их подходы полезны для понимания принципов смешения составов строительных растворов и иных материалов, объясняющих причины возникновения деформаций с течением времени [14]. Интересны исследования, раскрывающие причины сохранения исторических архивов и утрачивания части артефактов, без которых восполнение технических лакунов подчас бывает невозможно. Одна из причин состоит в асинхронности порядка сохранения архивных документов, вызванной несовпадением подхода к систематизации архитектурной документации и сохранения исторической информации сотрудниками архива [15].

Возвращаясь к башенным сооружениям, потенциально полезными являются также исследования, позволяющие рассматривать башни как историко-архитектурное пространство, а не объект. Как указывает ряд исследователей, отличие состоит в том, что башня как пространство обладает предельными границами, индивидуальными характеристиками, элементами времени и позиционированием в структуре общественного пространства [16]. На принятие решения о ходе восстановительных работ может оказывать влияние последовательность исторических изменений, так как некоторые авторы считают, что очередность строительных нововведений выполняет определяющую роль при сохранении ОКН [17]. Применительно к башенным сооружениям, в том числе на территории Чечни, следует отметить, что подобное мнение достаточно обоснованно ввиду

сложности выбора метода реставрации или технологии восстановительных работ без учета влияния времени на выбор предыдущими поколениями тех или иных инженерных решений.

Башенные сооружения на территории Чечни представляют собой как отдельные строения, так и комплексы. Публикации, посвященные проектированию башенных комплексов, раскрывают сущность целеполагания размещения дверных проемов по асимметричному принципу во всех строениях, входящих в состав комплекса [18]. Территориальная инфраструктура с учетом описания башенных сооружений способствует восприятию, особенно башенных комплексов, как части исторических районов. Несмотря на то, что башенные комплексы Чечни не стали источником градостроительства, эти объекты корректно рассматривать в контексте исторических районов по причине сохранившейся на территории отдельных селений сопутствующей исторической инфраструктуры [19]. В целом научные работы авторов других стран затрагивают преимущественно процесс реконструкции, но не реставрации башен. С высокой вероятностью это связано с динамичным развитием городов, в структуру которых входят такие исторические объекты, что определяет целесообразность изменения или расширения их функциональности [20].

Таким образом, изучение методологических подходов, а также их перспектив при реставрационных работах башенной архитектуры Чечни с учетом имеющихся сведений в упомянутых научных трудах подлежит развитию вследствие практической и теоретической значимости восстановления таких ОКН.

Цель настоящего исследования — определение перспектив методологических подходов реставрационных работ башенной архитектуры Чечни и их систематизация с учетом наиболее пригодных реставрационных задач, методов, технологий, видов восстановительных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор темы исследования обусловлен актуальностью восстановления башенной архитектуры на территории Чечни в последние годы и предстоящим большим объемом реставрационных работ, которые необходимо осуществить в отношении официально учтенных ОКН. Нестандартность геометрической формы и способов эксплуатации башенных сооружений в историческом периоде предполагает переосмысление имеющихся в архитектуре средств комплексной оценки ОКН и планирования восстановительных работ.

Применены методы исследования — сравнительно-сопоставительный анализ наиболее приемлемых методологических подходов к реставрационным работам башенной архитектуры Чечни; синтез, обобщение и формализация, которые в совокупности позволили выявить актуальные для башенной архитектуры Чечни реставрационные задачи, мето-

ды, технологии и виды восстановительных работ с учетом текущего технического состояния ОКН.

Использованы: нормативная база, открытые данные по башенным сооружениям Министерства культуры Российской Федерации, а также научные работы других авторов, изучающих башенную архитектуру.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Башенная архитектура Чечни относится к ключевым предметам культурного наследия региона и подлежит системной и последовательной восстановительной работе. Официально учтены лишь 284 объекта культурного наследия, в число которых входят все разновидности башен, обнаруженных на территории субъекта государства: боевые, полубоевые и жилые. Башенные сооружения Чечни обладают прямоугольной и квадратной геометрической формой основания, постепенным сужением стен кверху, асимметричным и асинхронным размещением оконных проемов, каменной кладкой и др.

Боевые и полубоевые башни эксплуатировались в оборонительных целях, функциональность жилых и полубоевых объектов базировалась преимущественно на создании жилых условий. Полубоевые башни являются промежуточным по функциональности ОКН, так как одновременно использовались в оборонительных и бытовых целях. Необходимо также отметить, что для жилых башен были харак-

терны опорные столбы внутри помещения, в то время как боевые башни не предполагали возможность учета подобной несущей конструкции ввиду многоярусной вертикальной конструкции.

Специфика башенных сооружений Чечни и их разновидности, а также имеющаяся информация о техническом состоянии официально учтенных объектов в совокупности подразумевают необходимость комплексной оценки методологических подходов сохранения и проведения реставрационных работ. В табл. 1 приведена оценка реставрационных задач, определяющих набор мероприятий по восстановлению культурного потенциала башенных сооружений Чечни.

Как показывает табл. 1, основная реставрационная задача в процессе восстановления и сохранения башенных сооружений Чечни состоит в укреплении каркаса исследуемых объектов и обеспечении функциональности, соответствующей ОКН. Некоторые реставрационные задачи затруднительны, так как восстановление башенных сооружений Чечни с учетом применяемых на момент их возведения строительных технологий и материалов предполагает осуществление множественных узконаправленных технических работ и значительную финансовую поддержку.

Особенности конструкции башенных сооружений подразумевают обязательность расчета прогнозируемого периода сохранения функциональности

Табл. 1. Реставрационные задачи по восстановлению и сохранению башенных сооружений Чечни

Table 1. Restoration tasks for the restoration and preservation of tower structures in Chechnya

Задача Task	Возможность выполнения реставрационной задачи при проведении восстановительных работ и сохранении ОКН The possibility of performing restoration tasks during restoration work and preservation of cultural heritage sites
Восстановление первоначального состояния Restoration of the original condition	Возвращение башенного сооружения к оригинальному виду — технически трудоемкая и необходимая задача, предполагающая значительные финансовые затраты при применении строительных технологий и восстановлении отдельных строительных материалов. Возобновление функциональности башенных сооружений в целом возможно, особенно в основных или частично сохранившихся из них, однако функциональность подлежит восстановлению лишь в культурных и туристических целях The return of the tower structure to its original appearance is a technically laborious and necessary task, involving significant financial costs in the application of construction technologies and the restoration of individual building materials. It is generally possible to restore the functionality of tower structures, especially in the main or partially preserved ones, but the functionality must be restored only for cultural and tourist purposes
Продление жизненного цикла (ЖЦ) объекта Extending the life cycle of an object	Увеличение ЖЦ башенных сооружений Чечни возможно лишь при условии проведения технических работ по укреплению конструкции объекта способами, позволяющими компенсировать отсутствие опорных элементов, что актуально для боевых башен An increase in the life cycle of Chechen tower structures is possible only if technical work is carried out to strengthen the structure of the facility in ways that make it possible to compensate for the absence of supporting elements, which is important for combat towers
Оптимизация функциональности Optimization of functionality	Башенные сооружения Чечни обладают высокой исторической ценностью для региона, а значит, формируется дополнительная целесообразность выполнения восстановительных работ таких объектов, в том числе при помощи современных архитектурных и инженерных решений Chechen tower structures have a high historical value for the region, which means that it is becoming more expedient to carry out restoration work on such facilities, including with the help of modern architectural and engineering solutions

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Задача Task	Возможность выполнения реставрационной задачи при проведении восстановительных работ и сохранении ОКН The possibility of performing restoration tasks during restoration work and preservation of cultural heritage sites
Сохранение объекта в прогнозируемом будущем Saving an object for the foreseeable future	Учитывая нестандартную конструкцию башенных сооружений и факторы риска, вызванные особенностями ландшафтного рельефа, решение реставрационной задачи по сохранению объекта возможно лишь на прогнозируемый период и в условиях систематических ремонтных работ Taking into account the non-standard design of the tower structures and the risk factors caused by the peculiarities of the landscape relief, the solution of the restoration task of preserving the object is possible only for a predictable period and under conditions of systematic repair work
Образовательная ценность Educational value	Как и в случае решения задачи по восстановлению первоначального состояния, а также оптимизации функциональности, проведение восстановительных работ целесообразно по причине высокой образовательной ценности башенных сооружений Чечни как объекта этнокультурного потенциала территории региона As in the case of solving the problem of restoring the original condition, as well as optimizing functionality, it is advisable to carry out restoration work due to the high educational value of Chechen tower structures as an object of the ethnocultural potential of the region
Оптимизация элементов эстетики Optimization of aesthetic elements	Восстановительные работы в отношении башенных сооружений в большей степени предполагают применение инженерных решений, так как первична конструкция объекта. Многие башенные сооружения отличаются наличием петроглифов на фасадных сторонах, являющихся отдельным произведением искусства и культурным наследием Restoration work in relation to tower structures to a greater extent involves the use of engineering solutions, since the primary design of the facility. Many tower structures are distinguished by the presence of petroglyphs on their facades, which are a separate work of art and cultural heritage
Поддержка развития Development support	Решение реставрационной задачи, направленной на поддержку функционального развития башенного сооружения, затруднительно по причине возможности и важности восстановления и сохранения таких объектов в культурных целях The solution of the restoration task aimed at supporting the functional development of the tower structure is difficult because of the possibility and importance of restoring and preserving such objects for cultural purposes

объекта до момента проведения ремонтных работ, направленных на достижение нормативных технических значений, принятых стандартами в отношении зданий и сооружений. При этом сохранение функциональности, как задача, оказывает влияние на возможность эксплуатации башенных сооружений в иных целях, помимо культурных.

Решение реставрационных задач по восстановлению башенных сооружений до их первоначального состояния, оптимизации их функциональности, продлению ЖЦ объекта и сохранению башенных сооружений на прогнозируемое будущее предполагает применение одного или совокупности реставрационных методов. В табл. 2 приведены допустимые для башенных сооружений реставрационные методы и произведена оценка возможности их применения с учетом высокой культурной ценности таких объектов.

Исходя из табл. 2, становится очевидным, что восстановительные работы в отношении башенных сооружений Чечни допустимы методами реставрации. Положительной стороной применения мер консервации является комплексная оценка технического состояния ОКН, по итогам которой предпринимаются меры, направленные на укрепление башенных сооружений. Строительство боевых башен осуществ-

лялось посредством внутренних деревянных лесов, которые возводились одновременно с возрастанием кладки и опирались на временные опорные консоли, выполнявшие, в свою очередь, функцию жестких связей в узлах углов. Кроме того, на уровне между вторым и третьим ярусами предусматривался ложный свод с радиальными каменными поясками, который был необходим в качестве внутреннего кольцевого пояса, нацеленного на сжатие. В основание стен и по углам сооружения в процессе строительства применялись крупные монолитные камни, целевое назначение которых состояло в предотвращении смещения кладки и дополнительном укреплении конструкции при дальнейшей неравномерной осадке основания. На рис. 1 представлена сохранившаяся часть боевой башни, расположенной в с. Моцкарой Итум-Калинского района Чеченской Республики, на рис. 2 продемонстрирован разрез боевой башни, позволяющий сформировать представление о ее внутренней планировке.

Если учесть, что боевые башни в древний период, а именно до X в., строились с использованием сухой кладки, то каркас не всегда мог выполнять функцию опоры как инженерного решения за исключением башен, возводимых как наскальные сооружения. Применение далее строительных растворов

Табл. 2. Оценка возможности проведения восстановительных работ и сохранения башенной архитектуры Чечни в соответствии с методикой реставрации

Table 2. Assessment of the possibility of carrying out restoration work and preserving the tower architecture of Chechnya in accordance with the restoration methodology

Меры обеспечения физической сохранности и сохранения историко-культурной ценности объекта Measures to ensure the physical safety and preservation of the historical and cultural value of the site	Возможность проведения восстановительных работ и сохранения объектов культурного наследия The possibility of carrying out restoration work and preservation of cultural heritage sites
Консервация Conservation	Применение консервации до предполагаемой реставрации технически возможно в отношении некоторых боевых башен, особенно возведенных в период позднего Средневековья. К примеру, некоторые боевые башни в Итум-Калинском районе, относящиеся к XIV–XVI вв., могут быть сохранены путем консервации при условии их расположения в благоприятной природно-ландшафтной локации The use of conservation before restoration is technically possible for some battle towers, especially those built during the late Middle Ages. For example, some battle towers in the Itum-Kalinsky district dating back to the 14th–16th centuries can be preserved by conservation, provided they are located in a favorable natural landscape location
Ремонт Repair	Данный метод затруднителен для применения, за исключением уже восстановленных путем реставрации ОКН. Ввиду того, что такие объекты единичны на территории Чечни, осуществление комплекса мероприятий, направленных на поддержание содержания ОКН, не представляется целесообразным This method is difficult to apply, with the exception of cultural heritage sites that have already been restored. Due to the fact that such sites are rare on the territory of Chechnya, the implementation of a set of measures aimed at maintaining the maintenance of cultural heritage sites does not seem appropriate
Реставрация Restoration	Применение реставрационной методики актуально для большинства башенных сооружений Чечни, расположенных в восточной, южной и западной частях региона, относящихся к древнему и средневековому периоду. Многие учтенные башни находятся в критическом состоянии, что выделяет процесс восстановления объектов путем реставрации в качестве главного способа сохранения культурного наследия The use of restoration techniques is relevant for most tower structures in Chechnya, located in the eastern, southern and western parts of the region, dating back to the ancient and medieval periods. Many of the listed towers are in critical condition, which highlights the process of restoring facilities through restoration as the main way to preserve cultural heritage

при каменной кладке без учета внешнего природного и человеческого воздействия стало одной из причин возможности сохранения зачастую части объекта, подлежащего реставрации.

Метод реставрации перспективен при восстановлении башенных сооружений, особенно в случаях, когда объект находится в допустимом техническом состоянии, характеризующемся второй и третьей группой предельного состояния по ГОСТ 27751–2014¹, или когда объект восстанавливался предыдущими поколениями и жителями местности в течение всего исторического периода. Несмотря на своевременно предпринятые меры по сохранению допустимого технического состояния башенных сооружений, на современном этапе применение метода реставрации предполагает удаление ранее привнесенных элементов внутри и снаружи башенных сооружений, а затем — восста-

новление утраченных элементов в соответствии с известными и приемлемыми технологиями.

Ввиду того, что башенные сооружения Чечни возможно восстановить методами реставрации, что наиболее актуально для сооружений, относящихся ко второй и третьей группе предельного технического состояния в соответствии со стандартами, в табл. 3 произведена оценка возможности применения реставрационных технологий при восстановлении и сохранении таких объектов культурного наследия.

Оценка реставрационных технологий в табл. 3 позволяет сформулировать вывод о том, что наиболее доступными технологиями реставрации являются 3D-сканирование и геофизические методы исследования. Необходимы дополнительные лабораторные возможности в рамках спектрального анализа, позволяющие восстановить недостающую информацию по применяемым в древний и средневековый периоды строительным материалам для отдельных архитектурных элементов. Несмотря на изученность структуры строительных материалов по историче-

¹ ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736?ysclid=mhtu49t9ks576352305>



Рис. 1. Башня боевая с. Моцкарой Итум-Калинский район Чеченской Республики. Фото 2020 г. [21, 22]

Fig. 1. The battle Tower in the village of Motskaroy, Itum-Kalinsky district of the Chechen Republic. Photo 2020 [21, 22]

ским и техническим данным, восстановление разрушенных до основания объектов станет более реализуемым при наличии фрагментарных сведений о структуре строительных материалов при возведении каждого отдельного архитектурного элемента,

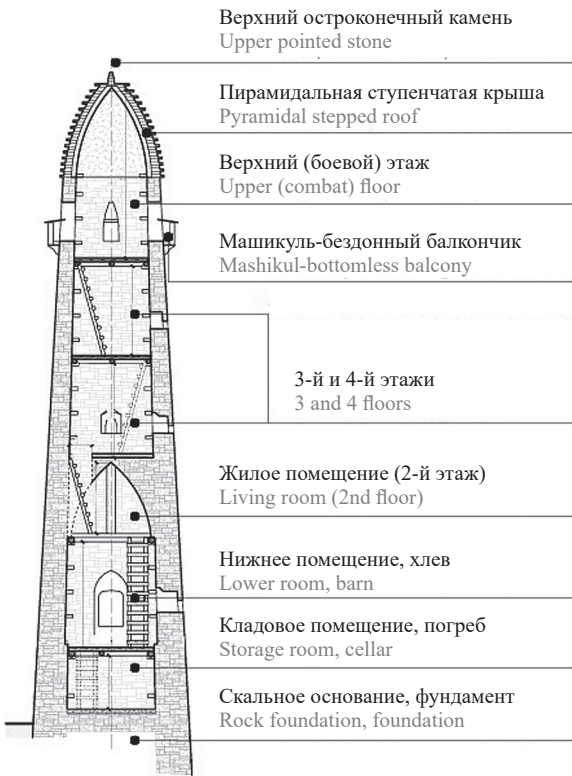


Рис. 2. Разрез боевой башни и ее внутренняя планировка, характерная для данного типа объектов на территории Чеченской Республики [21, 22]

Fig. 2. The section of the combat tower and its internal layout, typical for this type of objects in the territory of the Chechen Republic [21, 22]

визуализация которого утрачена в отчетной документации комиссий или не сохранена.

В табл. 4 представлены виды реставрационных работ оценки возможности восстановления и сохранения башенных сооружений Чечни.

Табл. 3. Оценка возможности применения реставрационных технологий при восстановлении и сохранении башенных сооружений Чечни

Table 3. Assessment of the possibility of using restoration technologies in the restoration and preservation of tower structures in Chechnya

Технология реставрации Restoration technology	Возможность реализации технологии при восстановлении и сохранении ОКН The possibility of implementing technology in the restoration and preservation of cultural heritage sites
3D-сканирование 3D scanning	При восстановлении и сохранении башенных сооружений Чечни создаются цифровые модели объектов для последующего структурного анализа выявленных деформаций и возможности разработки уточненных чертежей, оказывающих влияние на качество реставрационных работ During the restoration and preservation of tower structures in Chechnya, digital models of objects are created for subsequent structural analysis of the identified deformations and the possibility of developing refined drawings that affect the quality of restoration work
Геофизические методы исследования Geophysical research methods	Опыт восстановления Дерской башни и замкового комплекса «Цеча-Ахк» показал целесообразность применения томографии и георадарного зондирования, позволивших без деструктивного воздействия на объект выявить пустоты в каменной кладке и предпринятые ранее другими поколениями восстановительные меры The experience of restoring the Dera Tower and the Tsecha-Ahk castle complex has shown the expediency of using tomography and georadar sensing, which made it possible to identify voids in the masonry and restoration measures taken earlier by other generations without destructive effects on the object

Технология реставрации Restoration technology	Возможность реализации технологии при восстановлении и сохранении ОКН The possibility of implementing technology in the restoration and preservation of cultural heritage sites
Спектральный анализ Spectral analysis	Несмотря на наличие исторических и технических данных, относящихся к используемым строительным материалам на момент возведения башенных сооружений, до сих пор прослеживается недостаточность технической информации, затрагивающей структуру строительных материалов при возведении отдельных архитектурных элементов. Подобная информация по некоторым предположениям могла быть включена в утраченную отчетную документацию комиссий, изучавших особенности культурного наследия Чечни в начале XX в. Despite the availability of historical and technical data related to the building materials used at the time of the construction of the tower structures, there is still a lack of technical information concerning the structure of building materials during the construction of individual architectural elements. Such information, according to some assumptions, could have been included in the lost accounting documentation of the commissions that studied the peculiarities of the cultural heritage of Chechnya in the early twentieth century

Табл. 4. Виды реставрационных работ при оценке возможности восстановления и сохранения башенных сооружений Чечни

Table 4. Types of restoration work in assessing the possibility of restoring and preserving tower structures in Chechnya

Вид реставрации Type of restoration	Возможность применения вида реставрации при восстановлении и сохранении объектов культурного наследия The possibility of using a type of restoration in the restoration and preservation of cultural heritage sites
Восстановление отдельных элементов объекта Restoring individual elements of an object	Многие башенные сооружения находятся в критическом техническом состоянии, что не предполагает проведения реставрационных работ для отдельных элементов. Подобный вид реставрационных работ возможен лишь в единичных случаях Many tower structures are in critical technical condition, which does not imply restoration work for individual elements. This type of restoration work is possible only in isolated cases
Проведение реставрационных работ полного цикла Full cycle restoration work	Данный вид реставрационных работ соответствует текущей ситуации в сфере сохранения башенных сооружений как объектов культурного наследия This type of restoration work corresponds to the current situation in the field of preservation of tower structures as objects of cultural heritage
Восстановление утраченных частей объекта в соответствии с историческим обликом Restoration of the lost parts of the object in accordance with the historical appearance	По причине отсутствия утраченной отчетной документации комиссий, осуществляющих комплексные оценочные мероприятия в начале XX в., когда часть башенных сооружений находилась в ином техническом состоянии, проведение реставрационных работ путем восстановления утраченных частей таких объектов требует создания дополнительных лабораторных возможностей в рамках спектрального анализа, в том числе с применением искусственного интеллекта Due to the lack of lost accounting documentation from the commissions that carried out comprehensive assessment measures at the beginning of the twentieth century, when some of the tower structures were in a different technical condition, restoration work by restoring lost parts of such facilities requires the creation of additional laboratory capabilities within the framework of spectral analysis, including using artificial intelligence
Укрепление конструкции и восстановление целостности объекта Strengthening the structure and restoring the integrity of the facility	Реставрационные работы, направленные на укрепление конструкции и восстановление целостности башенных сооружений, по степени важности так же целесообразны, как и проведение реставрационных работ полного цикла Restoration work aimed at strengthening the structure and restoring the integrity of tower structures is just as important as carrying out full-cycle restoration work
Восстановление внешнего вида объекта Restoration of the appearance of the object	Указанный вид реставрационных работ является следствием или очередным этапом восстановления башенных сооружений после выполнения работ полного цикла и реализации мер по укреплению конструкций и восстановлению целостности ОКН This type of restoration work is a consequence or the next stage of the restoration of tower structures after a full cycle of work and the implementation of measures to strengthen structures and restore the integrity of the cultural heritage site



Рис. 3. Дерская башня до реставрации. Фото 2009 г. [21, 22]

Fig. 3. The Dera Tower before the restoration. Photo 2009 [21, 22]

Все обозначенные виды реставрационных работ в табл. 4 подлежат реализации на практике в разной степени. На основе технической информации, содержащейся в Едином государственном реестре объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации², следует отметить, что наиболее актуальными при реализации реставрационного метода являются мероприятия в рамках укрепления конструкции и восстановления целостности объекта, проведения реставрационных работ полного цикла. Иные виды восстановительных работ подлежат реализации лишь в той степени, в какой возможно достичь нормативных значений технического состояния официально учтенных ОКН.

Выявленные наиболее приемлемые реставрационные задачи, методы, технологии и виды при восстановлении и сохранении башенных сооружений Чечни могут быть реализованы не только с учетом объективной оценки их технического состояния, но и установленного законодательством порядка проведения подобных мероприятий. Согласно Федеральному закону от 25.06.2002 № 73-ФЗ, консервация, ремонт и реставрация объектов культурного наследия относятся к мерам, направленным на обеспечение физической сохранности и сохранение культурного объекта. Данные меры на практике охватывают все методы осуществления реставрационных работ³. В соответ-

² Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/>

³ Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901820936?ysclid=mhtuckzne352488679>



a

b

Рис. 4. Дерская башня: а — процесс реставрации (фото 2010 г. [21, 22]); б — после реставрации (фото 2011 г. [21, 22])

Fig. 4. The Dera Tower: a — is in the process of restoration (photo 2010 [21, 22]); b — after restoration (photo 2011 [21, 22])

ствии со ст. 40 упомянутого Закона, ремонтно-реставрационные мероприятия в отношении башенных сооружений Чечни частично соответствуют п. 1 данной статьи и в полном объеме — п. 2 ввиду критического состояния многих исследуемых объектов. Это значит, что перспективность применения методологических подходов реставрации башенной архитектуры Чечни может быть обеспечена при условии организации мероприятий в рамках спасательных археологических полевых работ. Было установлено, что башенные сооружения Чечни подлежат восстановлению методами реставрации, хотя согласно ст. 41 и 43 Закона консервация башенных сооружений в действительности возможна при условии реализации таких видов работ, как укрепление конструкции и восстановление целостности объекта без изменения предмета охраны культурного наследия.

Применение реставрационного метода в ходе восстановления башенных сооружений предусмотрено законодательством при помощи широкого перечня подходов, охватывающих не только указанные виды и технологии восстановления ОКН, но и иные, относящиеся к оценке технического состояния башенных сооружений, планированию восстановительных работ и их реализации, как это было осуществлено в свое время в отношении Дерской башни, расположенной в Итум-Калинском районе региона (рис. 3, 4).

Таким образом, перспективы методологических подходов реставрации башенной архитектуры Чечни реализуемы в следующей последовательности:

1. Реализация задач по восстановлению первоначального состояния, продлению ЖЦ объекта, сохранению объекта в прогнозируемом будущем.

- 1.1. Применение методов реставрации.

- 1.1.1. Использование технологий 3D-сканирования, геофизических методов исследования и спектрального анализа.

- 1.1.2 Проведение реставрационных работ полного цикла, мероприятий по укреплению конструкций и восстановлению целостности объекта, восстановлению утраченных частей объекта в соответствии с историческим обликом и его отдельных элементов.

2. Реализация задач по оптимизации функциональности башенных сооружений, обеспечению образовательной ценности, оптимизации элементов эстетики объектов и поддержки их развития.

- 2.1. Применение метода ремонта объекта культурного наследия.

- 2.1.1. Использование технологий, направленных на поддержание содержания ОКН.

- 2.1.2. Проведение мероприятий по восстановлению внешнего вида объекта.

Распределение методологических подходов в зависимости от реализации реставрационных задач и с учетом текущего технического состояния официально учтенных башенных сооружений позволяет сформулировать вывод о том, что на территории

Чечни в настоящее время и в обозримом будущем наиболее предпочтительны и актуальны реставрационные работы, связанные с восстановлением первоначального состояния башенных сооружений. Определяемые для реализации данной задачи методы, технологии и виды восстановительных мероприятий указывают на целесообразность проведения расширенной архитектурной деятельности, направленной на воссоздание башенных сооружений, многие из которых либо находятся в критическом техническом состоянии, либо разрушены до основания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные методологические подходы оптимальны при реставрации башенных сооружений Чечни и других регионов Российской Федерации, на территории которых также обнаружены идентичные ОКН. Обозначенные перспективы методологических подходов больше относятся к находящимся в критическом состоянии башенным сооружениям, так как реставрационные задачи, методы, технологии, виды восстановительных работ учитывают особенности оценки технического состояния таких объектов и нормативные возможности их восстановления. Если башенные сооружения находятся в техническом состоянии, не предполагающем, к примеру, восстановление объектов до первоначального состояния в полном объеме, определены иные реставрационные задачи, методы, технологии и виды мероприятий.

Оценка башенной архитектуры Чечни предусматривает применение методов реставрации с учетом критического технического состояния многих из официально учтенных объектов в регионе. Указанные методы соответствуют реализации реставрационных задач, направленных на восстановление первоначального состояния и обеспечение прогнозируемого ЖЦ ОКН. Выявленные наиболее пригодные технологии и виды реставрационных работ образуют оптимальную методологию реставрации башенной архитектуры, что соответствует актуальным реставрационным задачам.

Обозначенные методологические подходы с учетом перспектив могут быть применены архитекторами, специализирующимися на восстановлении башенных сооружений в Российской Федерации, так как ценностью является распределение реставрационных методов и действий в соответствии с задачами, что позволит сохранить исторический облик ОКН. Теоретическая значимость предложенной методологии и последовательности архитектурных действий заключается в возможном расширении научным сообществом видов реставрационных работ, реализуемых методами реставрации башенной архитектуры, особенно находящейся в критическом техническом состоянии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тесаев З.А. Текущие результаты обследования средневековых архитектурных объектов аула Кешта // Genesis: исторические исследования. 2022. № 12. С. 149–158. DOI: 10.25136/2409-868X.2022.12.39526. EDN YAWLFS.
2. Веремеев Д.В. История башенных сооружений: прошлое и настоящее // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 3. С. 177–195. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-177-195. EDN TVKDLP.
3. Баркова С.Н., Шумкина Т.Ф. Построение комплекта архитектурно-строительных чертежей Вавилонской башни // Россия молодая : сб. мат. XVII Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием 2025. EDN FMGZYU.
4. Шумилкин А.С. Формирование видов архитектурной реставрации в России в XIX–XXI вв. // Приволжский научный журнал. 2023. № 2 (66). С. 180–186. EDN GAKDMV.
5. Насуханов Ш.А. Особенности формирования объемно-пространственной композиции жилых башен чеченцев на Северном Кавказе // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 421–426. EDN SXJUVR.
6. Айдарова Г.Н. Башня Сююмбике: датировка памятника по архитектурно-конструктивным особенностям кирпичных стен и кирпично-каменного фундамента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. № 2 (72). С. 371–390. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.32. EDN UFLCNP.
7. Савельев Е.М., Чигрина А.И. Исторический потенциал нового Афона как культурного и туристического центра Абхазии // XVII Акумлинские чтения : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 178–182. EDN AXOLIM.
8. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б., Шаипова А.А. Оценка обеспеченности транспортной сетью регионов Северо-Восточного Кавказа для целей рекреации и туризма // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т. 69. № 4. С. 627–645. DOI: 10.21638/spbu07.2024.402. EDN LLCKLF.
9. Petherbridge G., Ismailov A.M., Gadzhiev A.A., Rabadanov M.R., Abdulaev A.-G.M., Murtuzaliev M.M. et al. The solar stag of the Chamalals and Tindals and other masonry petroglyphs in the upper Andiiskoe Koisu region of Dagestan and their relationships to similar phenomena in the mountain communities of the Caucasus: socio-ecological and historical perspectives // South of Russia: ecology, development. 2022. Vol. 17. Issue 2. Pp. 150–209. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-2-150-209
10. Иванов В.А. Этнокультурный ландшафт средневековых мавзолеев Волго-Уралья // Золотоордынское обозрение. 2024. № 1. С. 140–164. DOI: 10.22378/2313-6197.2024-12-1.140-164. EDN NZZRBK.
11. Яценко С.А., Сланов А.А., Хутинаев А.Х. Осетинские граффити на постройках верховьев Большой Лиахвы // Материалы по археологии и истории античного и средневекового Причерноморья. 2023. № 15. С. 555–589. DOI: 10.53737/5034.2023.44.99.018. EDN XFNVTO.
12. Букова М.И., Пименова Н.Н., Замараева Ю.С., Кистова А.В. Региональное своеобразие большого стиля: сибирский модерн // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Гуманитарные науки. 2023. Т. 16. № 11. С. 1956–1973. EDN FHZYCV.
13. Завадская И.А. Предвратные сооружения на плато Эски-Кермен: реальность и домыслы // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. 2023. Т. 28. № 6. С. 62–71. DOI: 10.15688/jvolsu4.2023.6.6. EDN FOBPLZ.
14. Font A. Difference and Nuance // AA Files. 2025. Vol. 81. Pp. 9–15.
15. Salvatore A., Galimberti B. Architectural Archives: Actors and Objects in Heritage Preservation // APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology. 2024. Vol. 54. Issue 3/4. Pp. 49–57.
16. Hanif K., Safarik D. Talking Tall: Hanif Kara Towards the Extraordinary, via the Interdisciplinary // CTBUH Journal. 2022. Vol. 3. Pp. 54–57.
17. Carbonero M.G., Fernandez Nieto M.A. The Gardens of the Alhambra and the Search for Spanish Modernism, 1953–1975 // Journal of the Society of Architectural Historians. 2021. Vol. 80. Issue 2. Pp. 202–218. DOI: 10.1525/jsah.2021.80.2.202
18. Alawadi K., Khaleel S., Benkraouda O. Design and Planning for Accessibility: Lessons from Abu Dhabi and Dubai's Neighborhoods // Journal of Housing and the Built Environment. 2021. Vol. 36. Issue 2. Pp. 487–520. DOI: 10.1007/s10901-020-09763-3
19. Mastrigli G. The Open City // Log. 2021. Vol. 53. Pp. 137–143.
20. Kornfeld R., Van Winckle Ch. Restoration of the Harlem Fire Watchtower // APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology. 2023. Vol. 53. Issue 4. Pp. 21–28.
21. Солтагиреев Т.Б. Дёрская башня: страница каменной летописи Чечни // Вестник. Зодчий. 21 век. 2021. № 4 (81). С. 78–79. EDN VOGZCK.
22. Солтагиреев Т.Б. Замковый комплекс «Цеча-Ахк» — уникальное наследие Чеченской Республики // Вестник. Зодчий. 21 век. 2021. № 4 (93). С. 38–41. EDN AVIBPX.

Поступила в редакцию 13 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Тамирлан Борисович Солтагиреев — архитектор-реставратор I категории, доцент кафедры архитектуры и дизайна; Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова); 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, д. 100; SPIN-код: 9649-5469, РИНЦ ID: 1307764, ORCID: 0009-0005-2636-4026; jnus@mail.ru.

REFERENCES

1. Tesaev Z.A. Current results of the survey of medieval architectural objects of the village of Keshhta. *Genesis: Historical Research*. 2022; 12:149-158. DOI: 10.25136/2409-868X.2022.12.39526. EDN YAWLFS. (rus.).
2. Veremeev D. The history of tower structures: past and present. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2024; 3:177-195. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-177-195. EDN TVKDLP. (rus.).
3. Barkova S.N., Shumkina T.F. Construction of a set of architectural and construction drawings of the Tower of Babel. *Young Russia : collection of materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical conference with international participation*. 2025. EDN FMGZYU. (rus.).
4. Shumilkin A.S. Formation of types of architectural restoration in Russia in the XIX–XXI centuries. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2023; 2(66):180-186. EDN GAKDMV. (rus.).
5. Nasukhanov Sh.A. Features of the formation of the three-dimensional composition of residential towers of Chechens in the North Caucasus. *Innovation & Investment*. 2023; 10:421-426. EDN SXJUVR. (rus.).
6. Aidarova G.N. Syuyumbike tower: dating of the monument by architectural and structural features of brick walls and brick-stone foundation. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2025; 2(72):371-390. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.32. EDN UFLCNP. (rus.).
7. Savel'ev E.M., Chigrina A.I. The historical potential of new Athos as a cultural and tourist center of Abkhazia. *XVII Aknullinsky readings : materials of the International scientific and practical conference*. 2022; 178-182. EDN AXOLIM. (rus.).
8. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedi-eva M.B., Shaipova A.A. Assessment of transport network provision in the regions of the north-eastern Caucasus for recreation and tourism purposes. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2024; 69(4):627-645. DOI: 10.21638/spbu07.2024.402. EDN LLCKLF. (rus.).
9. Petherbridge G., Ismailov A.M., Gadzhiev A.A., Rabadanov M.R., Abdulaev A.-G.M., Murtuzaliev M.M. et al. The solar stag of the Chamalals and Tindals and other masonry petroglyphs in the upper Andiiskoe Koisu region of Dagestan and their relationships to similar phenomena in the mountain communities of the Caucasus: socio-ecological and historical perspectives. *South of Russia: ecology, development*. 2022; 17(2):150-209. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-2-150-209
10. Ivanov V.A. Ethnocultural landscape of medieval mausoleums in the Volga-Urals. *Golden Horde Review*. 2024; 1:140-164. DOI: 10.22378/2313-6197.2024-12-1.140-164. EDN NZZRBK. (rus.).
11. Yatsenko S.A., Slanov A.A., Khutinaev A. Kh. Ossetian graffiti on the buildings in upper big Liakhva basin. *Proceedings in Archaeology and History of Ancient and Medieval Black Sea Region*. 2023; 15:555-589. DOI: 10.53737/5034.2023.44.99.018. EDN XFNVTO. (rus.).
12. Bukova M.I., Pimenova N.N., Zamaraeva Yu.S., Kistova A.V. Regional originality of the grand style: Siberian modern. *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2023; 16(11):1956-1973. EDN FHZYCV. (rus.).
13. Zavadsкая I.A. The structures outside the town gate atop the plateau of Eski-Kermen: reality and conjectures. *Science Journal of Volgograd State University. History. Area Studies. International Relations*. 2023; 28(6):62-71. DOI: 10.15688/jvol-su4.2023.6.6. EDN FOBPLZ. (rus.).
14. Font A. Difference and Nuance. *AA Files*. 2025; 81:9-15.
15. Salvatore A., Galimberti B. Architectural Archives: Actors and Objects in Heritage Preservation. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*. 2024; 54(3/4):49-57.
16. Hanif K., Safarik D. Talking Tall: Hanif Kara Towards the Extraordinary, via the Interdisciplinary. *CTBUH Journal*. 2022; 3:54-57.
17. Carbonero M.G., Fernandez Nieto M.A. The Gardens of the Alhambra and the Search for Spanish Modernism, 1953–1975. *Journal of the Society of Architectural Historians*. 2021; 80(2):202-218. DOI: 10.1525/jsah.2021.80.2.202
18. Alawadi K., Khaleel S., Benkraouda O. Design and Planning for Accessibility: Lessons from Abu Dhabi and Dubai's Neighborhoods. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2021; 36(2):487-520. DOI: 10.1007/s10901-020-09763-3
19. Mastigili G. The Open City. *Log*. 2021; 53:137-143.
20. Kornfeld R., Van Winckle Ch. Restoration of the Harlem Fire Watchtower. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*. 2023; 53(4):21-28.

21. Soltagireev T.B. The Derskaya Tower: a page of the stone chronicle of Chechnya. *Bulletin. The architect. 21st century*. 2021; 4(81):78-79. EDN VOGZCK. (rus.).

22. Soltagireev T.B. Tsecha-Akhk Castle complex — a unique heritage of the Chechen Republic. *Bulletin. The architect. 21st century*. 2021; 4(93):38-41. EDN AVIBPX. (rus.).

Received November 13, 2025.

Adopted in revised form on December 17, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

B I O N O T E S: **Tamirlan B. Soltagireev** — architect-restorer of the 1st category, Associate Professor of the Department of Architecture and Design; **Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionscikov**; 100 Isaev ave., Grozny, 364051, Chechen Republic; SPIN-code: 9649-5469, ID RSCI: 1307764, ORCID: 0009-0005-2636-4026; jnus@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.048

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34

Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений

Пётр Павлович Гайджуров¹, Надежда Геннадьевна Царитова²

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время актуальна проблема разработки легковозводимых самонесущих объектов, обеспечивающих надежную и универсальную защиту при любых экстремальных природных явлениях. К объектам такого класса можно отнести двухконтурные геодезические купольные системы, дизайн которых в полной мере отвечает современным направлениям геоклиматической или климатоустойчивой архитектуры. Несущий каркас двухконтурного геодезического купола формируется системой повторяющихся стержневых фрагментов, соединяемых с помощью специальных сборно-разборных узловых соединений. В литературе отсутствуют сведения о конечно-элементном моделировании динамического отклика двухконтурного геодезического купола на сейсмическое воздействие с учетом податливости узловых соединений стержней несущего каркаса.

Материалы и методы. Для численного анализа переходного процесса использовались макросы, написанные на языке APDL, встроенного в программный комплекс ANSYS Mechanical. Учет линейных и угловых податливостей узловых соединений стержней каркаса купола реализован с применением комбинированных конечных элементов COMBIN14. Процесс построения конечно-элементного ансамбля, состоящего из балочных и комбинированных элементов, автоматизирован.

Результаты. В итоге модального анализа установлено, что вид геометрии стержневого каркаса геодезического купола в сочетании с параметрами податливостей поворотных шарниров существенно влияет на собственные пары. Выполнены вычислительные эксперименты для двух вариантов каркасов геодезических куполов при сейсмическом воздействии интенсивностью восемь баллов.

Выводы. Предлагаемая концепция моделирования узловых соединений стержневого каркаса купола с помощью комбинированных конечных элементов позволяет опосредованно учесть эффект демпфирования при динамическом воздействии. Разработанная методика построения конечно-элементной модели каркаса геодезического купола с учетом шарнирно-стержневых связей может быть использована при проектировании дизайна реального арт-объекта подобного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двухконтурный геодезический купол, метод конечных элементов, модальный анализ, акселерограмма, переходной процесс, программные комплексы, узловое соединение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гайджуров П.П., Царитова Н.Г. Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 24–34. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34

Автор, ответственный за переписку: Надежда Геннадьевна Царитова, ncaritova@yandex.ru.

Modelling of seismic impact on a double-contour geodesic dome taking into account the flexibility of nodal connections

Peter P. Gaydzhurov¹, Nadezhda G. Tsaritova²

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² M.I. Platon South-Russian State Polytechnic University (NPI); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, an urgent problem is the development of self-supporting lightweight structures that provide reliable and universal protection in any extreme natural phenomena. Objects of this class include double-contour geodesic dome systems, the design of which fully meets modern trends in geoclimatic or climate-resistant architecture. The supporting frame of a double-contour geodesic dome is formed by a system of repeating rod fragments connected using special collapsible

nodal connections. There is no information in the literature on finite element modelling of the dynamic response of a double-contour geodesic dome to a seismic impact, taking into account the accuracy of the nodal joints of the supporting frame rods.

Materials and methods. Macros written in the APDL language embedded in the ANSYS Mechanical software package were used for numerical analysis of the transient process. Accounting for the linear and angular ductility of the nodal joints of the dome frame rods is implemented using combined finite elements COMBIN14. The process of building a finite element ensemble consisting of beams and combined elements is automated.

Results. As a result of the modal analysis, it was found that the type of geometry of the core frame of the geodesic dome in combination with the parameters of the ductility of the rotary balls significantly affects its own pairs. Computational experiments have been performed for two variants of geodesic dome frames under seismic impact with an intensity of eight points.

Conclusions. The proposed concept of modelling nodal joints of the dome core frame using combined finite elements allows us to indirectly take into account the effect of damping under dynamic influence. The developed technique of constructing a finite element model of the geodesic dome frame, taking into account hinge-rod connections, can be used in designing the design of a real art object of this type.

KEYWORDS: double-contour geodesic dome, finite element method, modal analysis, accelerogram, transition process, software packages, nodal connection

FOR CITATION: Gaydzhurov P.P., Tsaritova N.G. Modelling of seismic impact on a double-contour geodesic dome taking into account the flexibility of nodal connections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):24-34. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda G. Tsaritova, ncaritova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вид куполов, основанный на геодезической параметризации геометрии, широко применяется в строительстве [1–6]. Двухконтурный геодезический купол, помимо первого самонесущего строжневого контура, имеет второй пластинчатый контур. В качестве формообразующих элементов геодезического купола применяются равносторонние трехгранные, пятигранные и шестигранные поверхностно-стержневые структуры [7–10].

Геодезические купола обладают рядом преимуществ перед обычными сводами с положительной гауссовой кривизной — это архитектурная совместимость практически со всеми строительными объектами, оптимальная материалоемкость, равнопрочность, унификация конструктивных элементов [4, 11–13].

Цель исследования — анализ зависимости деформационных свойств двухконтурного геодезического купола от геометрических параметров при заданном динамическом воздействии. Для вычислительных экспериментов использовалось сочетание программных комплексов SolidWorks [14] и ANSYS Mechanical¹, позволяющих моделировать геометрию

¹ ANSYS Mechanical APDL Programmers Reference. Reference. Release 15.0 ANSYS, Inc. URL: <http://www.ansys.com>

и динамический отклик пространственной строжневой конструкции [15–17]. Настоящее исследование базируется на концепции шарнирного шестилучевого узлового соединения стержней несущего каркаса купола. Компонировочный эскиз узлового соединения показан на рис. 1. Подробное описание данной конструкции приведено в работе [18].

Предлагаемое узловое соединение отвечает требованиям унификации и компактности, что придает ему свойства мобильности, вариативности пространственных форм, быстрого монтажа и демонтажа конструкции без использования специальных инструментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В общем случае уравнение движения механической системы в конечно-элементной формулировке имеет следующий вид:

$$[M]\{W''(t)\} + [C]\{W'(t)\} + [K]\{W(t)\} = \{F_0\} + \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, демпфирования и жесткости ансамбля конечных элементов размерностью $ng \times ng$; $\{W''(t)\}$, $\{W'(t)\}$, $\{W(t)\}$ — векторы-столбцы соответственно узловых ускорений, скоростей, перемещений; $\{F_0\}$, $\{F(t)\}$ — векторы-столбцы

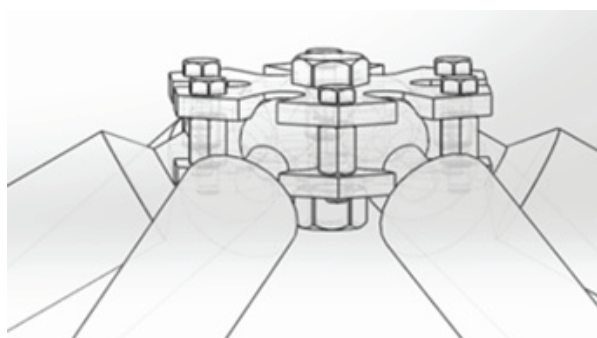


Рис. 1. Эскиз шестилучевого шарнирного узлового соединения

Fig. 1. Sketch of a six-beam articulated joint

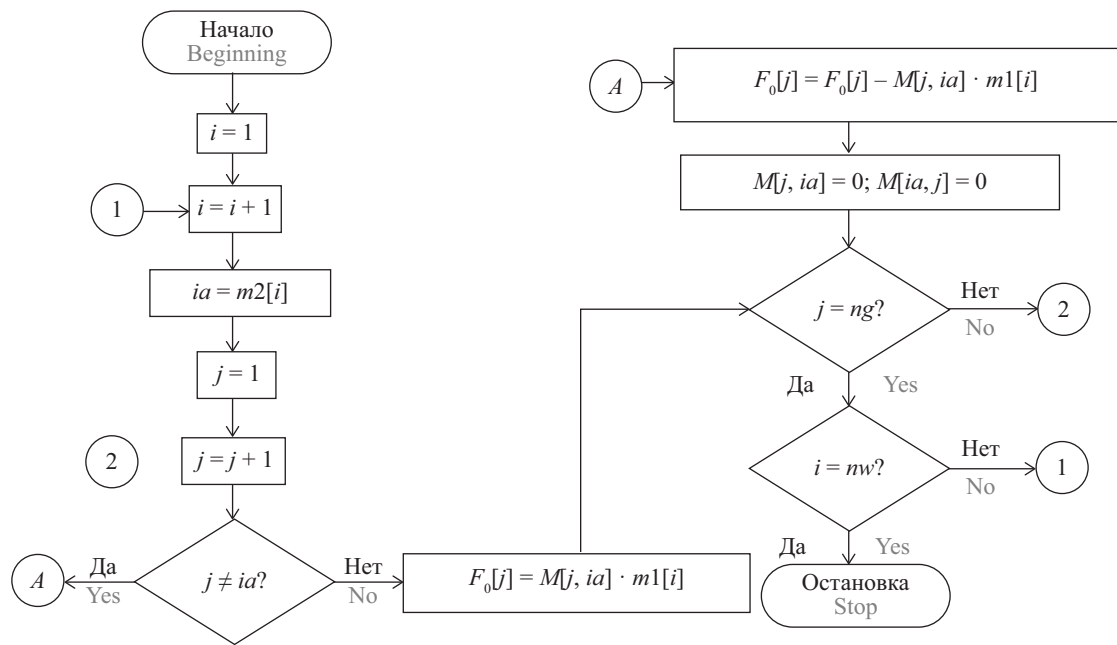


Рис. 2. Блок-схема алгоритма корректировки матрицы $[M]$ и $\{F_0\}$
Fig. 2. Block diagram of the matrix correction algorithm $[M]$ and $\{F_0\}$

заданных статических и динамических нагрузок в момент времени t .

В дальнейшем полагаем, что матрицы $[M]$ и $[K]$ согласованные. Кинематическое воздействие задаем с помощью акселерограммы $\{\bar{W}''(t)\}$. При таком способе задания динамического воздействия второе слагаемое правой части уравнения (1) $\{F(t)\} = 0$.

Для учета заданных узловых ускорений $\{\bar{W}''(t)\}$ выполняем корректировку матрицы $[M]$ и вектора-столбца $\{F_0\}$ на каждом временном шаге. Для этого введем одномерные массивы $[m1]$ и $[m2]$ размерностью $1 \times nw$, где nw — число заданных узловых ускорений на t_k временном шаге. Массив $[m2]$ предназначен для хранения в порядке возрастания номеров степеней свободы, в направлении которых заданы ускорения. Таким образом, элемент $m1[i]$ является заданным узловым ускорением $\bar{W}''_j(t)$ в направлении $m2[i]$ -й степени свободы на j -м временном шаге. Блок-схема алгоритма корректировки матрицы $[M]$ и вектора-столбца $\{F_0\}$ с учетом кинематических граничных условий приведена на рис. 2.

На рис. 3 квадратные и фигурные скобки в обозначениях матрицы $[M]$ и $\bar{W}''_i$ вектора-столбца $\{F_0\}$ опущены. В результате корректировки $[M]$ с учетом $\{\bar{W}''(t)\}$ внедиагональные строки и столбцы данной матрицы, соответствующие заданному ускорению $\bar{W}''_i$, ($i = 1, nw$), обнуляются, а элементы на главной диагонали (M_{ii}) остаются без изменений. При этом элементы вектора-столбца $\{F_0\}$ при $j \neq i$ ($j = 1, ng$) преобразуем вычитанием произведения $-M_{ji}\bar{W}''_i$, а элемент F_{0i} заменяем на произведение M_{ii} . Знак минус в произведении $M_{ji}\bar{W}''_i$ указывает на то, что узловые силы инерции направлены противоположно соответствующим ускорениям.

Выполним численный анализ динамического отклика двухконтурного геодезического купола на сейсмическое воздействие с учетом податливости узловых соединений. Рассмотрим два варианта стержневых каркасов (рис. 3). Расчетная схема купола для первого варианта стержневого каркаса показана на рис. 4. Для второго варианта каркаса расчетная схема аналогична. Габариты стержневых

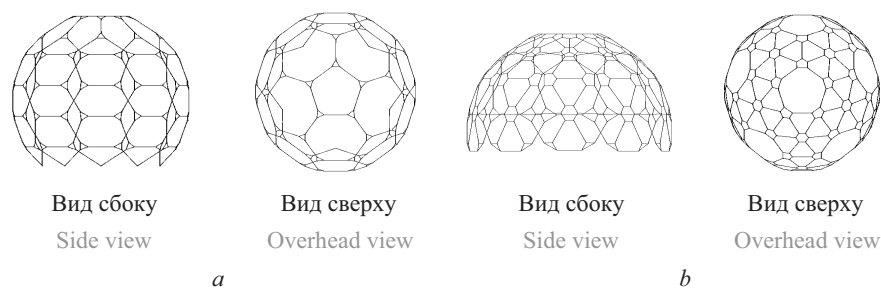


Рис. 3. Стержневые каркасы: a — первый вариант; b — второй вариант
Fig. 3. The rod grid: a — is the first option; b — is the second option

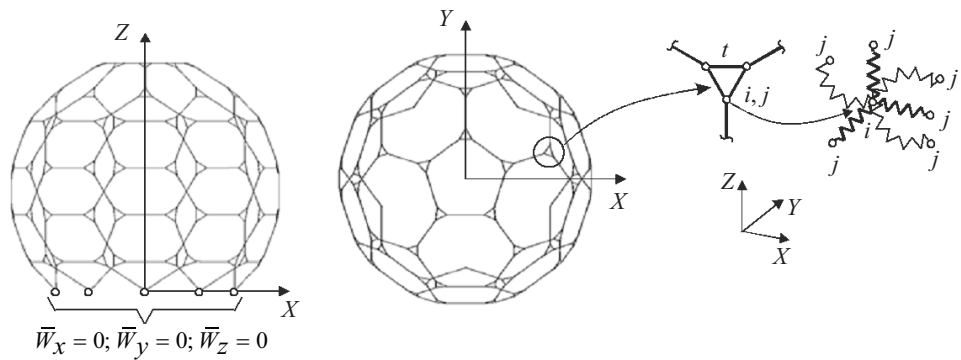


Рис. 4. Расчетная схема стержневого каркаса геодезического купола (первый вариант)

Fig. 4. The analytical model of the rod grid of the geodesic dome (the first option)

каркасов: для первого варианта — высота 2,45 м; размеры в плане 2,80 × 2,86 м; для второго варианта — высота 1,605 м; размеры в плане 1,429 × 1,404 м. Размеры представленных вариантов каркасов назначены на основании планируемых натурных испытаний данных моделей на динамическое воздействие.

Механические константы стержней каркасов (алюминиевый сплав): модуль упругости $E = 6,8 \times 10^4$ МПа; плотность $\rho = 2885$ кг/м³. Длины стержней каркасов и узловых платформ: первый вариант 0,42 и 0,15 м; второй вариант 0,35 и 0,12 м. Все стержни имеют трубчатую форму с наружным диаметром 0,018 м. Толщина стенки трубы 0,0015 м.

Как показано на рис. 4, расчетная схема включает платформу t , образованную из трех стержневых элементов. В каждой вершине равностороннего треугольника t между парными узлами i, j расположены упругие шарниры. Причем каждый упругий шарнир включает три линейных и три поворотных пружины. Для обозначения элементов упругого шарнира приняты следующие символы: k_x, k_y, k_z — коэффициенты жесткостей линейных пружин, Н/м, ориентированных вдоль осей X, Y, Z ; $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ — соответствующие жесткости поворотных пружин, Н·м/рад. Каждый стержень каркаса и узловой платформы моделируем одним балочным КЭ. Значения коэффициентов жесткости k_x, k_y, k_z принимаем численно равными величине E . Модуль упругости стержней узловой платформы принимаем равным $E_t = 10^{15}$ МПа, т.е. платформа практически недеформируемая.

Первые шесть собственных частот

The first six natural frequencies

$\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z,$ Н·м/рад N·m/rad	$\lambda_{1,2}$, Гц Hz	λ_3 , Гц Hz	λ_4 , Гц Hz	$\lambda_{5,6}$, Гц Hz
10^3	4,41	9,26	10,6	14,5
10^4	6,38	13,5	16,9	21,8
10^5	6,84 (6,90)	14,4 (14,5)	18,4 (18,6)	23,4 (23,6)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты модального анализа для первого варианта каркаса купола при различных значениях поворотных жесткостей представлены в таблице и на рис. 5. В таблице значения собственных частот λ_i приведены в Гц, в скобках представлены величины λ_i , соответствующие каркасу без упругих шарниров. Отметим, что значения поворотных жесткостей меньше 10^3 Н·м/рад превращают купол в геометрически изменяемую конструкцию. Здесь и далее линейные жесткости k_x, k_y, k_z принимались равными E . Связи, накладываемые на опорные узлы каркаса: $\bar{W}_x = 0; \bar{W}_y = 0; \bar{W}_z = 0$.

Аналогичные результаты для второго варианта каркаса при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад приведены на рис. 6. Как и следовало ожидать, ввиду симметрии рассматриваемых вариантов каркасов куполов получены кратные собственные пары, в частности пары 1 и 2.

При значениях $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад для второго варианта каркаса получаем следующие значения собственных частот: $\lambda_{1,2} = 17,13$ Гц; $\lambda_3 = 30,43$ Гц; $\lambda_4 = 40,36$ Гц; $\lambda_6 = 45,13$ Гц. При этом формы собственных колебаний совпадают с показанными на рис. 6.

Как видно из приведенных в таблице и на рис. 6 данных, с увеличением жесткостей поворотных пружин на два порядка значения первых собственных частот возрастают для первого варианта каркаса в 1,5 раза, для второго варианта — в 1,8 раза.

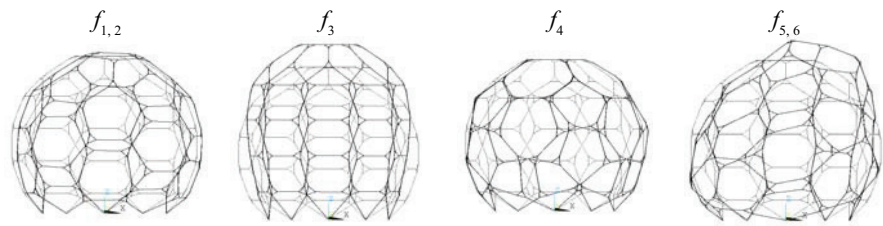


Рис. 5. Первые шесть собственных форм f_i (первый вариант каркаса)
Fig. 5. The first six own forms f_i (the first version of the of the rod grid)

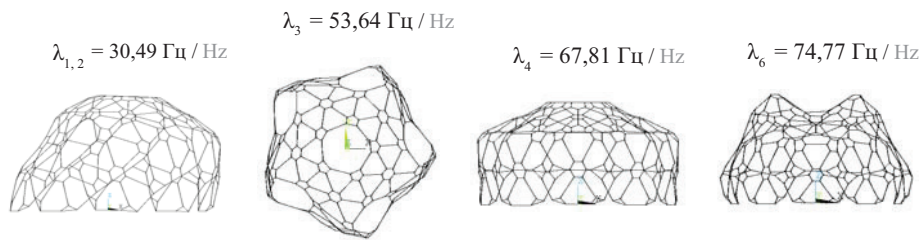


Рис. 6. Первые шесть собственных пар для второго варианта каркаса
Fig. 6. The first six own forms for the second version of the rod grid

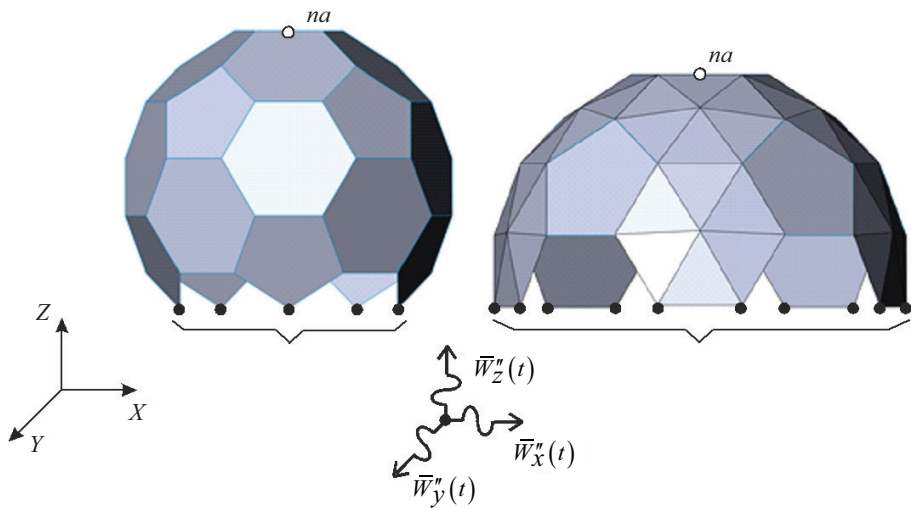
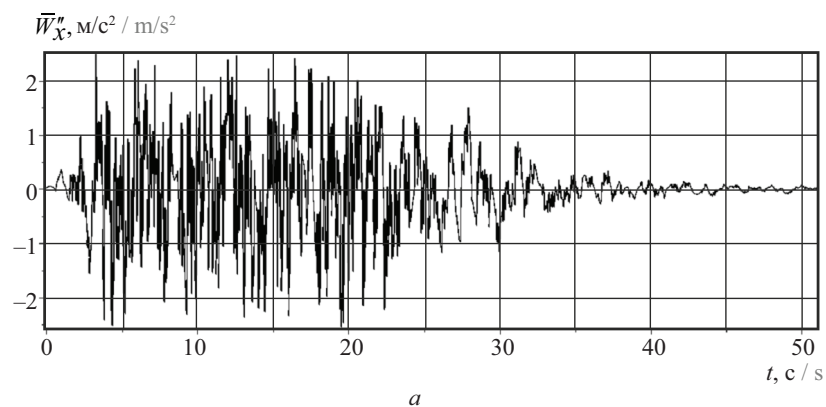


Рис. 7. Схема моделирования сейсмического воздействия на купола
Fig. 7. Simulation scheme of seismic impact on domes



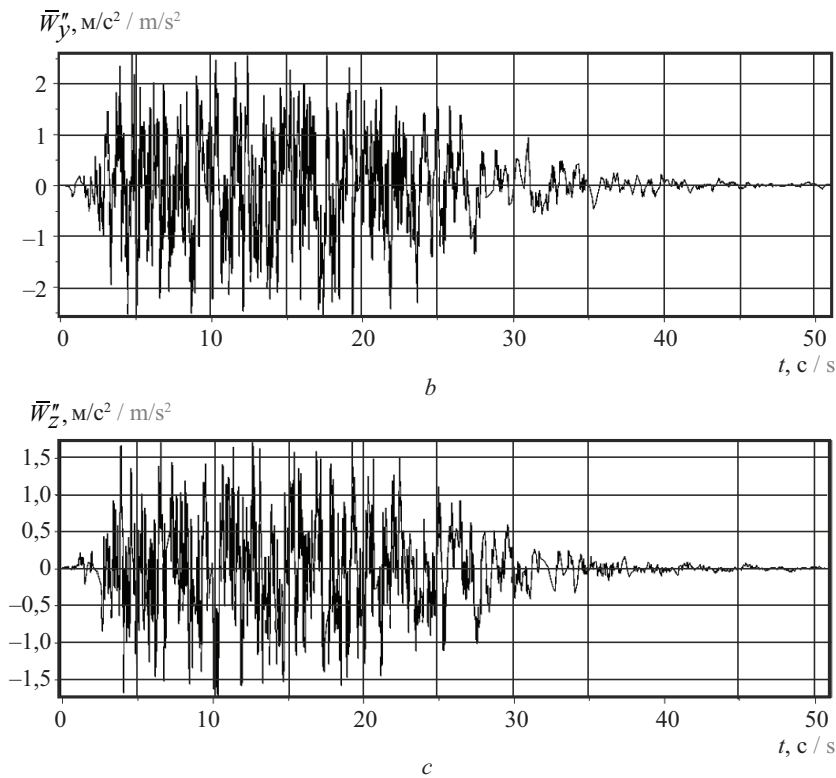


Рис. 8. Компонента акселерограммы по оси: а — X; б — Y; с — Z

Fig. 8. The X-axis component of the accelerogram (a); the Y-axis component of the accelerogram (b); the Z-axis component of the accelerogram (c)

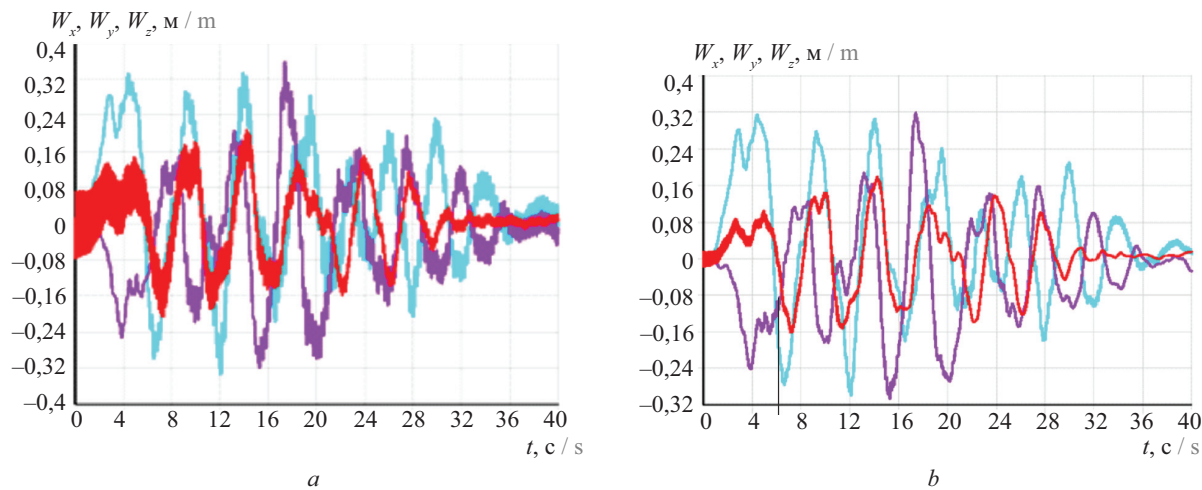


Рис. 9. Графики $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ в точке na (рис. 5): — W_x ; — W_y ; — W_z ; а — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад; б — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад

Fig. 9. The schedule $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ at the point na (Fig. 5): — W_x ; — W_y ; — W_z ; а — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ N·m/rad; б — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ N·m/rad

Сейсмическое воздействие на рассматриваемые варианты куполов задаем в форме трехкомпонентной акселерограммы $\bar{W}_x''(t), \bar{W}_y''(t), \bar{W}_z''(t)$ (рис. 7).
На рис. 8 показаны графики функций $\bar{W}_x''(t), \bar{W}_y''(t), \bar{W}_z''(t)$, соответствующие сейсмическому воздействию интенсивностью 8 баллов. Из приведенных графиков

видно, что основное кинематическое воздействие сосредоточено на временном интервале от 3 до 30 с.
При реализации расчетов на сейсмическое воздействие демпфирование по Релею не учитываем.
Результаты конечно-элементного моделирования динамического отклика в виде графиков колеба-

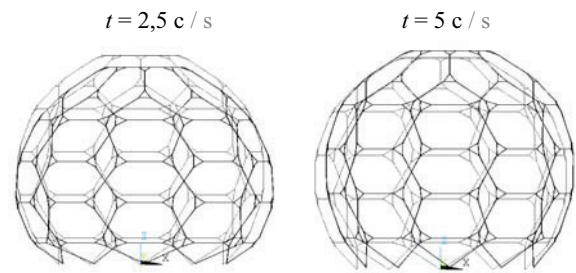


Рис. 10. Визуализация каркаса купола в процессе вынужденных колебаний ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$)

Fig. 10. Visualization of the dome frame in the process of forced vibrations ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$)

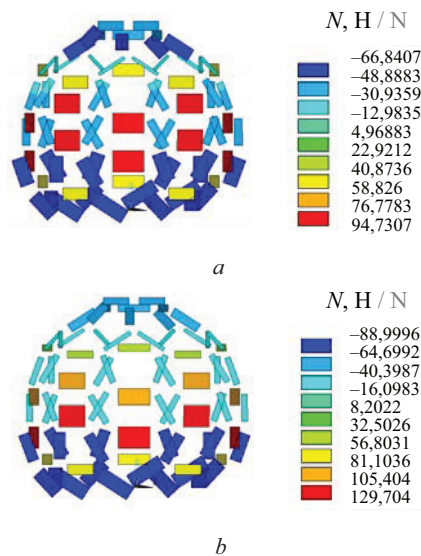


Рис. 11. Визуализация распределения N в стержнях купола ($t = 2,5 \text{ с}$): $a — \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$; $b — \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$

Fig. 11. Visualization of the N distribution in the dome rods $a — \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$; $b — \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$

ний вершины геодезического купола $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ для первого варианта каркаса в точке na представлены соответственно на рис. 9. Здесь и далее шаг по временной координате принимался равным 0,01 с; число шагов — 4000.

Визуализация деформации купола для моментов времени $t = 2,5 \text{ с}$ и $t = 5 \text{ с}$ показана на рис. 10 (тонкий

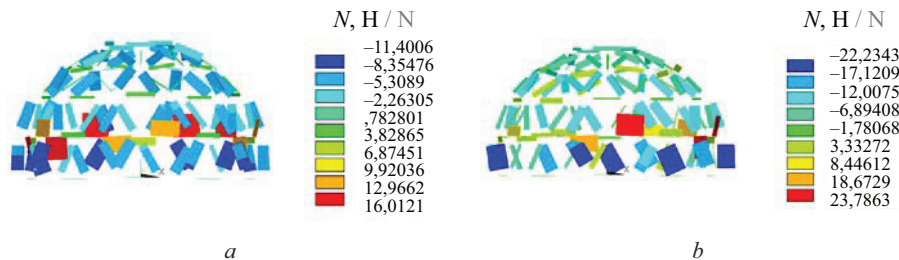


Рис. 14. Визуализация распределения N в стержнях купола: $a — 2,5 \text{ с}$; $b — 8 \text{ с}$

Fig. 14. Visualization of the N distribution in the dome rods: $a — 2,5 \text{ с}$; $b — 8 \text{ с}$

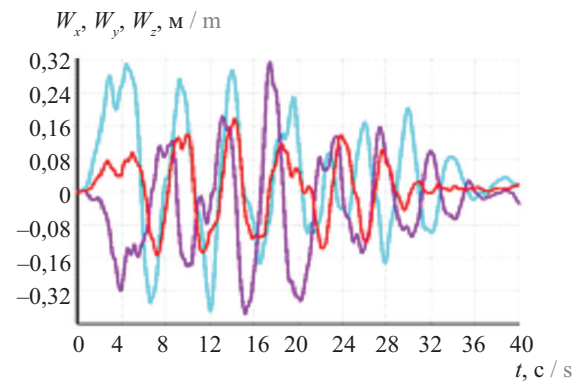


Рис. 12. Графики $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ в точке na (рис. 5, второй вариант): — W_x ; — W_y ; — W_z

Fig. 12. The schedule $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ at the point na (Fig. 5, the second option): — W_x ; — W_y ; — W_z

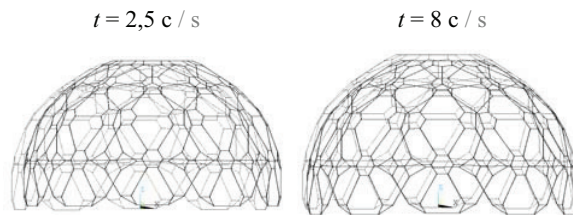


Рис. 13. Визуализация второго варианта каркаса купола в процессе вынужденных колебаний

Fig. 13. Visualization of the second version of the dome frame in the process of forced vibrations

контур — это положение купола в недеформированном состоянии).

Из графиков вынужденных колебаний на рис. 9 видно, что амплитудные значения перемещений $W_{x\max}$ и $W_{y\max}$ на верхней отметке достигают величины 0,32 м. При этом колебания купола носят затухающий характер. Причем при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ в начальный момент ($t \leq 5 \text{ с}$) наблюдается заметное биение в направлении оси Z .

Визуализация полей экстремальных значений продольных сил N , соответствующих моменту времени $t = 2,5 \text{ с}$, в стержнях каркаса купола (первый вариант) представлена на рис. 11.

Как видно из рис. 9, увеличение поворотных жесткостей в узловых соединениях приводит к росту

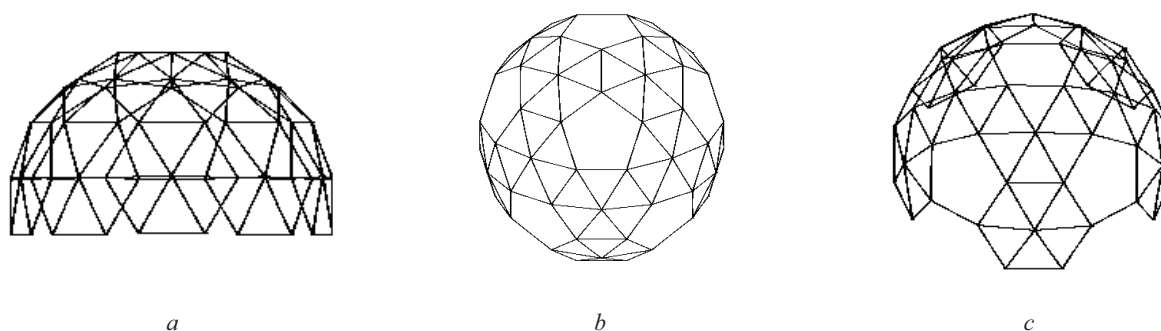


Рис. 15. Модель второго варианта каркаса купола без узловых шарнирных соединений: *a* — вид сбоку; *b* — вид в плане; *c* — аксонометрия

Fig. 15. The model of the second version of the dome frame without nodal hinge joints: *a* — side view; *b* — view in the plan; *c* — axonometry

максимальных растягивающих усилий в стержнях на 36 %. При этом в момент времени $t = 2,5$ с сжимающее продольное усилие увеличивается в 1,3 раза, а растягивающее — в 1,4 раза (рис. 11).

Результаты аналогичного динамического расчета для второго варианта стержневого каркаса представлены на рис. 12–14.

Расчетным путем установлено, что для второго варианта каркаса купола значения жесткостей поворотных пружин не влияют на конечный результат. Сравнивая графики колебаний на рис. 9, *b* и рис. 12, находим, что они практически идентичны. Это свидетельствует о том, что второй вариант каркаса купола по жесткости узловых соединений стержней эквивалентен модели без узловых шарнирных соединений, показанной на рис. 15.

Следует также отметить, что для второго варианта каркаса купола при заданном сейсмическом воздействии характерны более низкие экстремальные значения продольных усилий в стержнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с предлагаемой концепцией исходная геометрия геодезического купола формируется с помощью системы твердотельного моделирования SolidWorks. На этом этапе из повторяющихся равносторонних пяти и шести узловых поверхностей собирается многогранник купола заданной конфигурации. Далее сформированная твердотельная модель импортируется в программный комплекс ANSYS Mechanical, где формируется базовая геометрия модели стержневого каркаса купола. С применением булевых операций все стержни укорачиваются на величину характерного размера площадки узлового соединения. Таким образом отдельно формируется геомет-

рия стержней каркаса и соответствующих площадок узловых соединений. Для построения конечно-элементного ансамбля несущего каркаса геодезического купола, состоящего из стержневых и комбинированных элементов, использована схема фрагментарной сборки заархивированных файлов в программном комплексе ANSYS.

С помощью модального анализа, выполненного для рассматриваемых моделей каркасов геодезических куполов, было выявлено влияние жесткостей поворотных пружин на собственные пары данных конструкций. В частности, установлено, что жесткостные характеристики купола, образованного из правильных пяти- и шестигранников, наиболее существенно зависят от параметров поворотных пружин.

Для динамического расчета каркаса купола использованы кинематические граничные условия, в соответствии с которыми в узлах основания конечно-элементной модели задавались ускорения в направлении глобальных осей X , Y , Z . С целью методологического анализа реализуемого подхода к моделированию динамического отклика на сейсмическое воздействие приведен подробный алгоритм реструктуризации глобальной матрицы масс и соответствующего вектора правых частей уравнения движения с учетом заданных узловых ускорений. В расчетах применены оцифрованные акселерограммы землетрясения интенсивностью восемь баллов. Установлено, что графики вынужденных колебаний для рассматриваемых моделей каркасов практически идентичны. Вместе с тем динамические реакции, возникающие в опорных стержнях каркаса, принимают наименьшее значение для варианта каркаса, образованного из усиленных шестигранников (второй вариант).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Травуш В.И., Антошкин В.Д., Ерофеева И.В., Гудожников С.С. Исследование конструктивно-технологических возможностей сборных сферических оболочек // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 89–101. EDN SFOZYN.
2. Есипова А.А. Применение геодезических куполов в строительстве: преимущество и недостатки // Наука и современность. 2015. № 38. С. 8–11. EDN UAWBBF.
3. Zhivotov D.A., Pastukh O.A., Tilinin Yu.I. Architectural and spatial planning solutions of spherical shape buildings // Contemporary Problems of Architecture and Construction. 2021. Pp. 91–96. DOI: 10.1201/9781003176428-20
4. González-Avilés A.B., Pérez-Carramiñana C., Galiano-Garrigós A., Pérez-Millán M.I. Energy Benefits of Tourist Accommodation Using Geodesic Domes // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 505. DOI: 10.3390/buildings14020505
5. Rapp M., Cabrera D., Lu S. A polytriangular dome for acoustic retroreflection, and its application to creative-arts practice-led research // Applied Acoustics. 2022. Vol. 195. P. 108860. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108860
6. Bysiec D., Maleska T. Numerical Analysis of Steel Geodesic Dome under Seismic Excitations // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 16. P. 4493. DOI: 10.3390/ma14164493
7. Da Silva L.S., Oliveira S., Costa R., Gentili F. Design and Analysis of Steel Structures Considering the 3D Behaviour of the Joints // Advanced Steel Construction. 2020. Vol. 16. Issue 2. Pp. 137–145. DOI: 10.18057/IJASC.2020.16.2.5
8. Павлов Г.Н. Основные концепции автоматизации архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 10 (562). С. 104–108. EDN PFAKVD.
9. Kolpakov A., Dolgov O., Korolskiy V., Popov S., Anchutin V., Zykov V. Analysis of Structural Layouts of Geodesic Dome Structures with Bar Filler Considering Air Transportation // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 242. DOI: 10.3390/buildings12020242
10. Лахов А.Я. Приближенный способ определения максимальных растягивающих напряжений в стержнях двухконтурных геодезических куполов системы «Р» от воздействия собственного веса // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 58–65. EDN RTUKHL.
11. Rossot D., Machado R.D., Barbieri N., de Lima K.F. Experimental and Numerical Study of a Geodesic Dome Under Static and Dynamic Loads and the Influence of Nodal Connections // Experimental Techniques. 2022. Vol. 46. Issue 5. Pp. 823–834. DOI: 10.1007/s40799-021-00509-6
12. Grunbaum B., Shephard G.C. Duality of Polyhedra // Shaping Space. 2013. Pp. 211–216. DOI: 10.1007/978-0-387-92714-5_15
13. Tarnai T. Geodesic Domes: Natural and Man-Made // International Journal of Space Structures. 2011. Vol. 26. Issue 3. Pp. 215–227. DOI: 10.1260/0266-3511.26.3.215
14. Дударева Н., Загайко С. SolidWorks 2011 на примерах. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 496 с. EDN SDQLTR.
15. Gaydzhurov P., Tsaritova N. Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. Issue 3. Pp. 14–23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
16. Царитова Н.Г., Курбанов А.И., Курбанова А.А. Энергоэффективные здания на основе трансформируемых каркасов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 91–103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB.
17. Царитова Н.Г., Тумасов А.А., Курбанова А.А., Штанкевич А.В. Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. № 2. С. 6–19. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1. EDN ORSBSV.
18. Патент RU № 2586351 C1, МПК E04B 1/58. Шарнирный узел пространственной стержневой конструкции регулярной структуры / Царитова Н.Г., Бузало Н.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»; заявл. № 2015100939/03 от 12.01.2015. Оpubл. 10.06.2016.

Поступила в редакцию 19 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Пётр Павлович Гайджуров — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений, советник РААСН; Донской государственный технический университет (ДГТУ); 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 293542, Scopus: 57222067013, ORCID: 0000-0003-3913-9694; gpp-161@yandex.ru;

Надежда Геннадьевна Царитова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 621100, Scopus: 59552644800, ResearcherID: M-8648-2016, ORCID: 0000-0002-0923-5848; ncaritova@yandex.ru.

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

REFERENCES

1. Travush V.I., Antoshkin V.D., Erofeeva I.V., Gudozhnikov S.S. Study of the design and technological capabilities of prefabricated spherical shells. *Regional Architecture and Engineering*. 2014; 2:89-101. EDN SFOZYN. (rus.).
2. Esipova A.A. Application of geodesic domes in construction: advantages and disadvantages. *Science and Modernity*. 2015; 38:8-11. EDN UAWBBF. (rus.).
3. Zhivotov D.A., Pastukh O.A., Tilinin Yu.I. Architectural and spatial planning solutions of spherical shape buildings. *Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 2021; 91-96. DOI: 10.1201/97810-03176428-20
4. González-Avilés A.B., Pérez-Carramiñana C., Galiano-Garrigós A., Pérez-Millán M.I. Energy Benefits of Tourist Accommodation Using Geodesic Domes. *Buildings*. 2024; 14(2):505. DOI: 10.3390/buildings-14020505
5. Rapp M., Cabrera D., Lu S. A polytriangular dome for acoustic retroreflection, and its application to creative-arts practice-led research. *Applied Acoustics*. 2022; 195:108860. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108860
6. Bysiec D., Maleska T. Numerical Analysis of Steel Geodesic Dome under Seismic Excitations. *Materials*. 2021; 14(16):4493. DOI: 10.3390/ma14164493
7. Da Silva L.S., Oliveira S., Costa R., Gentili F. Design and Analysis of Steel Structures Considering the 3D Behaviour of the Joints. *Advanced Steel Construction*. 2020; 16(2):137-145. DOI: 10.18057/IJASC.2020.16.2.5
8. Pavlov G.N. Basic concepts of automation of architectural design of geodesic domes and shells. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2005; 10(562):104-108. EDN PFAKVD. (rus.).
9. Kolpakov A., Dolgov O., Korolskiy V., Popov S., Anchutin V., Zykov V. Analysis of Structural Layouts of Geodesic Dome Structures with Bar Filler Considering Air Transportation. *Buildings*. 2022; 12(2):242. DOI: 10.3390/buildings12020242
10. Lakhov A.Ya. The Approximate Method of Maximal Tensile Stress Determination in Rods of Double-Contour Geodetic Domes of the System “R” Exposed to Dead Load. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:58-65. EDN RTUKHL. (rus.).
11. Rossot D., Machado R.D., Barbieri N., de Lima K.F. Experimental and Numerical Study of a Geodesic Dome Under Static and Dynamic Loads and the Influence of Nodal Connections. *Experimental Techniques*. 2022; 46(5):823-834. DOI: 10.1007/s40799-021-00509-6
12. Grunbaum B., Shephard G.C. Duality of Polyhedra. *Shaping Space*. 2013; 211-216. DOI: 10.1007/978-0-387-92714-5_15
13. Tarnai T. Geodesic Domes: Natural and Man-Made. *International Journal of Space Structures*. 2011; 26(3):215-227. DOI: 10.1260/0266-3511.26.3.215
14. Dudareva N., Zagayko S. *SolidWorks 2011 with Examples*. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2011; 496. EDN SDQLTR. (rus.).
15. Gaydzhurov P., Tsaritova N. Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(3):14-23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
16. Tsaritova N.G., Kurbanov A.Ib., Kurbanova A.A.I. Energy-efficient buildings based on transformable frames. *Building and Reconstruction*. 2022; 6(104):91-103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB. (rus.).
17. Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kurbanova A.A., Shtankevich A.V. Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(2):6-19. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1. EDN ORSBSV. (rus.).
18. Patent RU No. 2586351 C1, IPC E04B 1/58. *Hinged joint of a spatial rod structure of regular structure* / Tsaritova N.G., Buzalo N.A.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov”; application No. 2015100939/03 dated 12.01.2015. Publ. 10.06.2016.

Received April 19, 2025.

Adopted in revised form on April 27, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

B I O N O T E S: **Peter P. Gaydzhurov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation; ID RSCI: 293542, Scopus: 57222067013, ORCID: 0000-0003-3913-9694; gpp-161@yandex.ru;

Nadezhda G. Tsaritova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 621100, Scopus: 59552644800, ResearcherID: M-8648-2016, ORCID: 0000-0002-0923-5848; ncaritova@yandex.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43

Верификация результатов физического и численного моделирования системы «свая – скальный массив»

Михаил Григорьевич Зерцалов, Дарья Александровна Силантьева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство объектов повышенного класса ответственности, в частности, требует передачи высоких значений нагрузок на основание, что нередко достигается посредством свайных фундаментов, заглубляемых в скальные массивы. Расчет их несущей способности включает прогнозирование доли нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи и ее основанием, однако сумма этих значений недопустима, поэтому необходимо точно спрогнозировать доли этих значений. Данный прогноз осложняется разнообразием свойств скальных грунтов, масштабным фактором и сложной работой контакта «свая – массив». Существует несколько методов прогнозирования работы сваи, наиболее распространенный — метод конечных элементов. Цель исследования — выполнение верификации результатов физического и численного моделирования, реализуемого в программном комплексе ZSoil, для последующего более глубокого изучения совместной работы сваи и скального массива.

Материалы и методы. Численное моделирование осуществлялось в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ZSoil 3D с учетом фактически полученных характеристик используемых материалов. Для физического моделирования подготовлено три образца, идентичных численной модели, испытанных далее в установке трехосного сжатия.

Результаты. Получены качественные и количественные результаты проведенного моделирования. Качественные результаты — установлено разрушение всего контакта «свая – скальный массив» как на лабораторных образцах, так и в численной модели. Количественно результаты сопоставлялись по графикам зависимости осадки головы сваи от возникающих напряжений.

Выводы. По результатам численного и физического моделирования характер и этапность разрушения системы идентичны, что определено в ходе визуального осмотра образцов и полученных результатов в ПВК. Количественная оценка результатов выполнена в рамках сравнения полученных графиков зависимости осадки головы сваи от напряжений, возникающих в ней. Сопоставление показало максимальное расхождение значений, равное ~ 15 %, что подтверждает применимость ПВК в последующем исследовании системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система «свая – скальный массив», скальный массив, физическое моделирование, численное моделирование, ПВК ZSoil

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству Научно-образовательного центра «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна за возможность проведения физического моделирования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зерцалов М.Г., Силантьева Д.А. Верификация результатов физического и численного моделирования системы «свая – скальный массив» // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 35–43. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43

Автор, ответственный за переписку: Дарья Александровна Силантьева, silantevada@mgsu.ru.

Verification of the results of physical and numerical modelling of the “pile – rock mass” system

Mikhail G. Zertsalov, Daria A. Silantjeva

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

ABSTRACT

Introduction. The construction of objects of a high class of responsibility, in particular, requires the transfer of high loads to the foundation, which is often achieved through pile foundations buried in rock masses. The calculation of their bearing capacity includes predicting the proportion of the load taken by the side surface of the pile and its base, however, the sum of these values is unacceptable, for this reason it is necessary to accurately predict the proportions of these values. This forecast is complicated by the variety of properties of rocky soils, the scale factor and the complex work of the “pile – rock mass” contact. There are several methods for predicting pile performance, in particular the finite element method. The purpose of this work is to verify the results of physical and numerical modelling implemented in the ZSoil software package (PC), for the subsequent deeper study of the joint work of the pile and the rock mass.

Materials and methods. Numerical modelling was carried out in the ZSoil 3D software-computing complex, taking into account the actually obtained characteristics of the materials used. To carry out physical modelling, three specimens were prepared, identical to the numerical model, and then tested in a triaxial compression installation.

Results. Qualitative and quantitative results of the simulation were obtained. Qualitative results — the destruction of the entire “pile – rock mass” contact was established both on laboratory specimens and in a numerical model. Quantitatively, the results were compared using graphs of the dependence of the settlement of the pile head on the stresses that arise.

Conclusions. Both according to the results of numerical and physical modelling, the nature and stages of destruction of the system are identical to what was established during the visual inspection of the specimens and the results obtained in the PC. A quantitative assessment of the results was carried out by comparing the obtained graphs of the dependence of the settlement of the pile head on the stresses arising in it. The comparison showed a discrepancy in values at the characteristic point corresponding to the complete destruction of the contact, ~ 15 %, which confirms the applicability of the PC in the subsequent study of the system.

KEYWORDS: “pile – rock mass” system, rock mass, physical modelling, numerical modelling, PC ZSoil, pile, bearing capacity, verification

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the management of the Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan for the opportunity to conduct physical modelling.

FOR CITATION: Zertsalov M.G., Silantyeva D.A. Verification of the results of physical and numerical modelling of the “pile – rock mass” system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):35-43. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43 (rus.).

Corresponding author: Daria A. Silantyeva, silantevada@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство «тяжелых» сооружений повышенного класса ответственности, таких как высотные здания или мосты, стало более распространенным. Ключевой задачей проектирования этих объектов является необходимость передачи больших нагрузок на основание, для чего проектировщики отдают предпочтение строительству на прочных скальных массивах, выбирая свайные фундаменты, заглубляемые в коренную породу.

Расчет несущей способности сваи в скальном массиве сводится к прогнозу доли нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи и ее основанием. Существующие исследования доказали возможность передачи до 30 % приходящейся нагрузки на основание даже после полного разрушения боковой поверхности, что говорит о важности учета как несущей способности по боковой поверхности сваи, так и под ее нижним концом¹.

В отличие от проектирования сваи в дисперсных грунтах простая сумма двух значений несущих способностей недопустима² [1]. Это приведет к неоправданному запасу, а значит, и перерасходу материалов и экономической нецелесообразности, поэтому требуется точно знать их процентное соотношение для конкретной системы.

Прогнозирование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия представляет собой сложную задачу из-за большого разнообразия структурных особенностей скальных массивов и, как следствие, создает достаточный разброс значений физических и механических характеристик скальных грунтов, из которых складывается массив. Возникающий по этой причине мас-

штабный фактор [2, 3] объясняет то, что результаты лабораторных и полевых испытаний не дают точных данных, так как охватывают слишком малые объемы породы.

Стоит также отметить влияние сложного характера разрушения контакта «свая – скальный массив» на работу всей системы. Благодаря изменению свойств контакта можно оказать влияние на несущую способность сваи и ее перемещения. Все эти особенности приводят к тому, что в одних и тех же скальных грунтах система может работать по-разному [4, 5].

На сегодняшний день существует не так много исследований, посвященных проектированию свайных фундаментов в скальных массивах, что говорит о необходимости более подробного изучения характера деформирования и разрушения системы «свая – скальный массив», уточнения методик их расчета [6–14].

Наиболее точным подходом к прогнозированию изменения НДС рассматриваемой системы, пользующимся большой популярностью, служит метод конечных элементов (МКЭ) [15–18], однако результаты численного моделирования требуют большого количества входных параметров и часто занижают значения перемещений сваи.

Цель настоящего исследования — выполнение верификации результатов численного моделирования, реализуемого в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ZSoil, и физического моделирования работы системы «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия, для последующего более подробного изучения работы сваи в скальном массиве в соответствующем комплексе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Физическое моделирование

Физическое моделирование реализовывалось на специальном сертифицированном оборудовании производства ООО «НПП Геотек». Испытательная установка включала в себя комплект из кинематического нагрузочного устройства 500 кН, нагнетатель

¹ LRFD Bridge Design Specifications // American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 9th ed. and interim revisions. LRFDUS-9. Washington, DC, 2020. 1904 p.

² СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. 2021.



Рис. 1. Общий вид установки для проведения испытаний на трехосное сжатие

Fig. 1. General view of the installation for testing three-axis compressions

2 МПа, блоки управления, камеру трехосного сжатия типа А и персональный компьютер, оснащенный программным обеспечением (ПО) АСИС 4.1. Проводится испытание по консолидированнонедренированной схеме при гидростатическом давлении, равном 5 % от предела прочности материала на одноосное сжатие ~ 600 кПа при кинематическом режиме нагружения со скоростью 2 МПа/с. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Физическая модель — это цилиндр диаметром 300 мм и высотой 400 мм, в котором бурилась скважина под сваю диаметром 40 мм и высотой 200 мм. Такие размеры принимались для обеспечения отсутствия влияния границ фрагмента на работу сваи.

В публикации [19] было установлено, что влияние на работу системы оказывают не столько фактические значения модулей деформации, сколько их отношение: E_b/E_r . Для упрощения и экономии ресурсов при подготовке образцов в рамках данного исследования принято решение использовать

цементно-песчаные смеси (ЦПС) марок М300 и М100 для материалов сваи и окружающего массива соответственно.

По критерию квазисплошности [2] допускаем, что размеры отдельностей скального массива малы относительно моделируемой конструкции, что позволяет применять методы механики сплошных сред и переходить эмпирически к приведенному значению модуля деформации массива, моделируя его сплошной средой.

Подготовка образцов

Изготовление образцов реализовывалось в следующей технологической последовательности:

1. Подготовка опалубки образца из ПВХ труб диаметром 315 мм: распил трубы на отрезки длиной 450 мм; монтаж металлического диска на дно; обработка внутренних стен и дна смазывающим раствором Литолом (рис. 2).

2. Подготовка цементно-песчаного раствора марки, соответствующей окружающему массиву в текущем испытании.

Цементно-песчаные смеси, используемые при моделировании: смесь цементно-песчаная М100 BROZEX; пескобетон KALIBER М300. Замешивание раствора в гравитационной бетономешалке в соответствии с инструкцией: замешивание сухой смеси с водой в необходимом соотношении: для М100 — 4,5–5,5 л воды температурой 15–20 °С на 25 кг смеси. Выдержка — 3–5 мин.

3. Заполнение формы получившимся раствором соответствующей массиву марки, вибрирование до требуемой консистенции (рис. 3).

4. Монтаж самодельной конструкции опалубки из трубы ПВХ диаметром 40 мм, длиной 200 мм для моделирования сваи в образце (рис. 4).

5. Выдержка образца — 28 суток. Армирование сваи выполнялось пространственным арматурным каркасом продольно-поперечного типа. Продольная армату-



Рис. 2. Подготовка опалубочной конструкции

Fig. 2. Preparation of the formwork structure

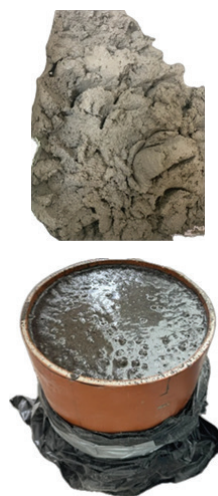


Рис. 3. Подготовка ЦПС, заполнение формы

Fig. 3. Preparing the CSM and filling out the form



Рис. 4. Конструкция опалубки сваи, монтаж
Fig. 4. Pile formwork construction, installation

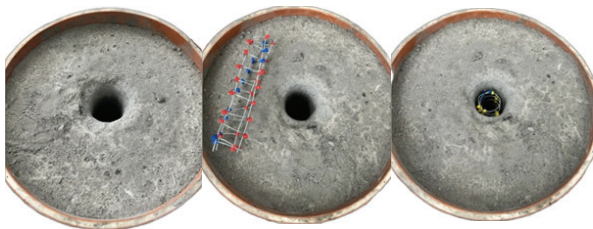


Рис. 5. Демонтаж опалубки сваи с последующим монтажом арматуркаса
Fig. 5. Dismantling of pile formwork followed by reinforcement installation

ра — четыре «арматуры» из оцинкованной проволоки диаметром 12 мм и длиной ≈ 200 мм. Поперечная арматура представлена спиралью из аналогичной проволоки. Диаметр арматуркаса ≈ 35 мм. Последующий демонтаж опалубки и монтаж арматуркаса в скважину (рис. 5).

6. Подготовка цементно-песчаного раствора марки, соответствующей свае в текущем испытании (М100 или М300 соответственно), замешивание раствора

в гравитационной бетономешалке. Цементно-песчаные смеси, применяемые при моделировании сваи, аналогичны используемым при подготовке материала массива. Для моделирования сваи требуется 0,8 кг смеси марки М100 и 1 кг марки М300, замешивание реализуется аналогично.

7. Далее осуществляется заполнение скважины, вибрирование. Выдержка образца — 28 сут. Общий вид готового образца представлен на рис. 6.

Ход испытания

1. Для реализации корректной передачи нагрузки изготовлен переходный элемент от штока к свае из монолитного алюминия, посредством которого передача реализовывалась точно на голову сваи, не задевая окружающий массив (рис. 7).

2. Образец покрывался силиконовой водонепроницаемой оболочкой и устанавливался на постамент в камеру прибора. Между переходным элементом и образцом прокладывалась прослойка в виде бумажных фильтров соответствующего свае диаметра во избежание возникновения концентраторов напряжений на границе различных по прочности материалов при передаче нагрузки.

3. Выполнялся монтаж камеры с последующим ее заполнением водой.

Всего проведено три испытания с целью обеспечения надежности и объективности результатов лабораторных испытаний.

Численное моделирование

Численное моделирование проводилось в ПБК ZSoil 3D — швейцарском ПО, проверенном временем и широко применяемом в мире. Расчетная схема абсолютно идентична физической модели (рис. 8, 9).

Физико-механические характеристики материалов массива и сваи принимались на основе проведенной серии испытаний в приборе трехосного сжатия для скальных грунтов^{3, 4} (рис. 10).

³ ГОСТ 30416–2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.

⁴ ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.



Рис. 6. Общий вид физической модели
Fig. 6. General view of the finished physical model



Рис. 7. Установка образца в камеру прибора
Fig. 7. Installation of the specimen in the device chamber

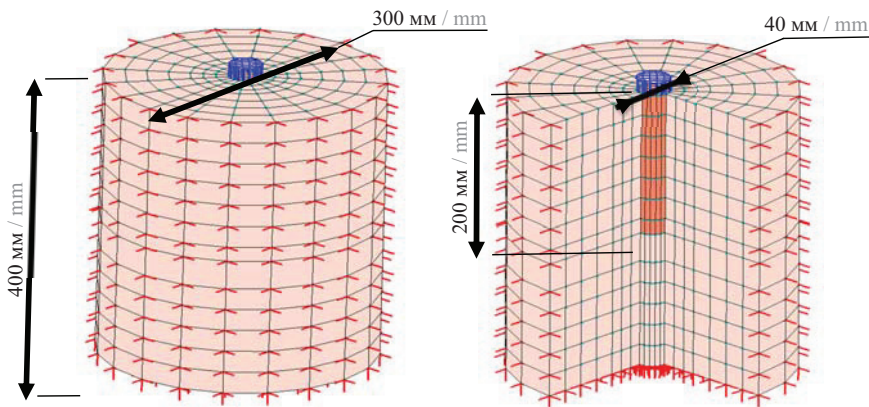


Рис. 8. Расчетная схема в ПК ZSoil 3D

Fig. 8. Geomechanical model in ZSoil 3D

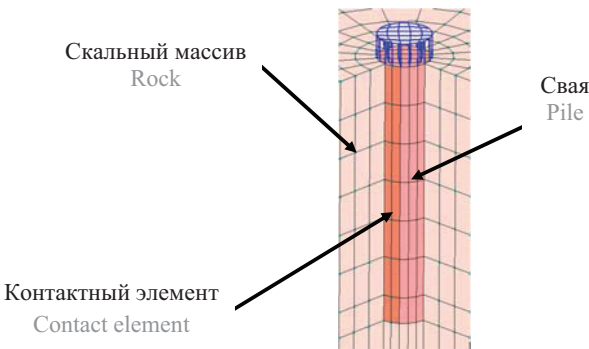


Рис. 9. Фрагмент расчетной схемы: свая, контактный элемент

Fig. 9. Fragment of the calculation scheme: pile, contact element



Рис. 10. Образец в приборе трехосного сжатия до и после испытания

Fig. 10. Specimen in a triaxial compression device before and after testing

Полученные характеристики материалов физической модели

The obtained characteristics of the materials of the physical model

Марки ЦПС Marks CSM	E , МПа / MPa	c , МПа / MPa	φ , град degree
М100 массив M100 rock mass	1625	2,4	41
М300 свая M300 pile	4523	2,6	39

Результирующие значения механических характеристик ЦПС М300 и М100, принятые в численном моделировании, представлены в таблице.

Для моделирования корректной совместной работы системы «свая – скальный массив» также был задан специальный контактный элемент. Определение фактических характеристик контакта затруднительно, поэтому их жесткостные характеристики устанавливались в соответствии с исследованиями [18–20] по следующим формулам:

$$k_n = \frac{E_m}{(1 + \nu) R}; \quad (1)$$

$$k_s = \frac{k_n}{2(1 + \nu)}. \quad (2)$$

Обжимающие напряжения в модели задавались через граничные условия посредством функций нагружения в Z_Soil: load function. Осевая нагрузка прикладывалась в виде равномерно распределенной, приложенной к голове сваи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование

По результатам выполненных расчетов анализировалось предельное состояние системы на основе разрушения окружающего массива, сваи и контак-

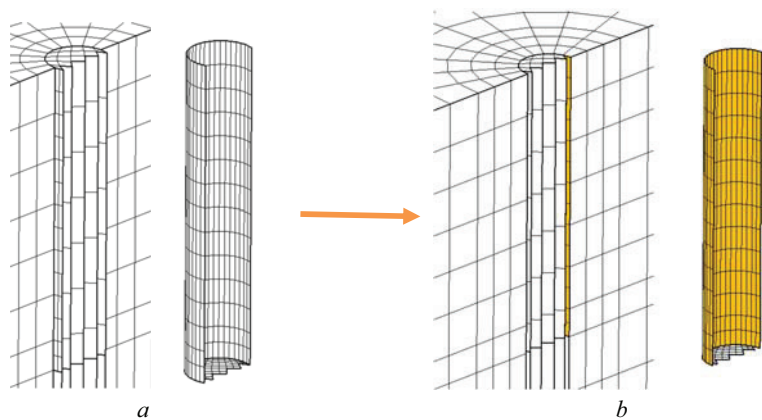


Рис. 11. Результаты расчетов: фрагменты (a) — состояние системы при $Q = 1450$ кПа; b — полное разрушение контакта при $Q = 1540$ кПа

Fig. 11. Calculation results: fragments (a) — system state at $Q = 1,450$ kPa; b — complete contact failure at $Q = 1,540$ kPa



Рис. 12. Фрагмент образца после испытания. Разрушение области контакта «свая – массив»

Fig. 12. A fragment of the specimen after testing. Failure of the “pile – rock mass” contact area

тного элемента, а также соответствующие вертикальные осевые перемещения сваи.

По результатам расчета установлено почти мгновенное разрушение всего контактного элемента «свая –

массив» при нагрузке $Q = 1,54$ МПа (оранжевые элементы на рис. 11).

Далее был зафиксирован резкий рост осадки сваи, что соответствует потере несущей способности по боковой поверхности.

Физическое моделирование

Разрушение всех образцов происходит схожим образом, что и по результатам численного моделирования: на образцах зафиксировано полное разрушение контакта «свая – массив» (рис. 12), что качественно подтверждает результаты численного моделирования.

Количественно результаты верифицировались по графикам зависимости напряжений, возникающих на голове сваи от прикладываемой нагрузки, от перемещений головы сваи, построенным в одной системе координат (рис. 13).

Результирующие графики численного моделирования и физического (осредненный) приведены на рис. 13. На графике результатов численного моделирования участок AB соответствует полному разрушению контакта, почти мгновенному с увеличением нагрузки. Аналогично участок $A'B'$ на графике

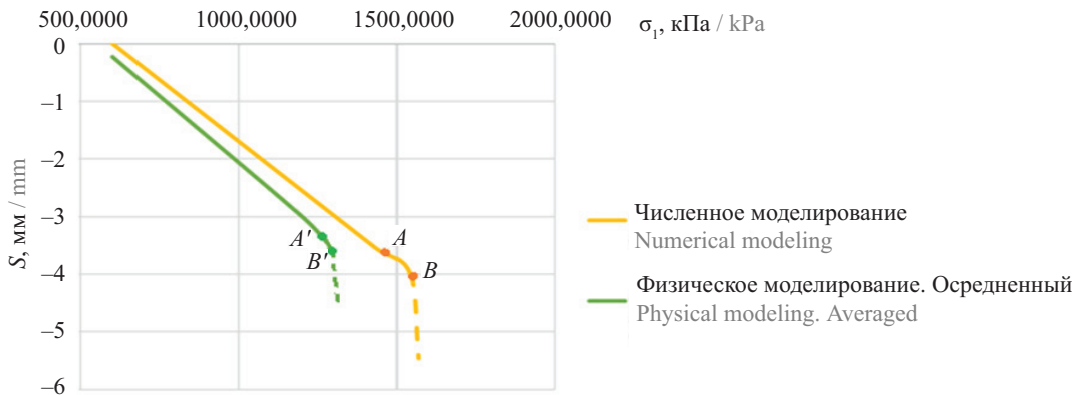


Рис. 13. Графики «осадка – нагрузка» физического (осредненный) и численного моделирования

Fig. 13. Settlement – load graphs of physical (averaged) and numerical modelling

результатов физического моделирования — не линейно и свидетельствует о разрушении контакта «свая – массив». Далее происходит срыв сваи, о чем говорит мгновенный прирост ее осадки. Точки *B*, *B'* можно считать точкой потери несущей способности сваи по боковой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования подготовлена геомеханическая модель в ПК ZSoil 3D, описывающая систему «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия, материалы и геометрические характеристики которой были приняты на основании изученной литературы и данных практического опыта. Для верификации результатов, полученных численным методом, создана аналоговая физиче-

ская модель, проведено три испытания для повышения достоверности результатов.

Сопоставление результатов показало, что характер деформирования и разрушения системы «свая – скальный массив», установленный по результатам численного моделирования, соответствует проведенным испытаниям физического моделирования. На рис. 13 представлены графики зависимости перемещений головы сваи от напряжений, возникающих в ней, по результатам численного и физического моделирования максимальное расхождение результатов составило ~ 15 %, что находится в пределах инженерной точности и подтверждает достоверность полученных результатов. По результатам верификации была обоснована дальнейшая применимость программно-вычислительного комплекса с целью более подробного исследования совместной работы буронабивной сваи и скального массива в условиях осевого сжатия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В., Брыксина А.А. Оценка несущей способности сваи в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, на действие вертикальной нагрузки // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 3 (34). С. 7–25. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25. EDN UXPEZG.

2. Зерцалов М.Г. Геомеханика. Введение в механику скальных грунтов. М. : Издательство АСВ, 2014. 352 с. EDN TBDUEH.

3. Hoek E., Kaiser P.K. Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, 1995.

4. Zhang L. Drilled Shafts in Rock. Analysis and Design. London : CRC Press, 2004. 396 p. DOI: 10.1201/9780203024423

5. Zhang L. Analysis and Design of Axially Loaded Drilled Shafts Socketed in Rock // Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering at MIT. 1997. 167 p.

6. Ильинов М.Д., Коришунов В.А., Поспехов Г.Б., Шоков А.Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. 2023. № 5. С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02. EDN KWXDVA.

7. Разводовский Д.Е., Скориков А.В. Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 3 (26). С. 74–85. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85. EDN KZYBMU.

8. Кузнецов Н.Н. Исследование прочностных свойств и удельной энергии деформирования горных

пород в условиях трехосного сжатия // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 140–145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145. EDN SOYEYH.

9. Шарафутдинов Р.Ф., Ботанин Д.П. Исследование сопротивления свай по боковой поверхности в скальных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 4. С. 9–16. EDN GAMNLY.

10. Шарафутдинов Р.Ф., Шулятьев О.А., Исаев О.Н., Закатов Д.С. Исследования взаимодействия буронабивных свай со скальными грунтами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 5. С. 11–16. EDN SQVSIM.

11. Шулятьев О.А., Шарафутдинов Р.Ф., Шулятьев С.О. Обобщение результатов испытаний буронабивных свай в скальных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 1. С. 2–7. EDN PIMBDH.

12. Ощепкова И.А., Сычкина Е.Н. Проблемы лабораторного определения механических свойств полускальных нижнепермских грунтов г. Перми // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 59–63. EDN OJHLTT.

13. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods : a review // Underground Space. 2017. Vol. 2. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.03.003

14. Ye X., Tang C., Phoon K.-K., Chen J. Development and use of axial load test databases for analysis and design of soft rock sockets // Canadian Geotechnical Journal. 2025. Vol. 62. Pp. 1–21. DOI: 10.1139/cgj-2024-0155

15. Barton N. A model study of rock-joint deformation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Vol. 9. Issue 5. Pp. 579–582. DOI: 10.1016/0148-9062(72)90010-1

16. Karzulovic A., Read J. Rock mass model // Guidelines for Open Pit Slope Design. 2009. Pp. 83–139. DOI: 10.1071/9780643101104.ch05

17. Brown D.A., Turner J.P., Castelli R.J., Loeher E.J. Drilled Shafts Construction Procedures and Design Methods: NHI Course No. 132014: Geotechnical Engineering Circular No. 10. Washington, 2010. 970 p.

18. Зерцалов М.Г., Никушкин М.В. Мировой опыт в проектировании свай в скальных грунтах // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 120. EDN OWEBRV.

19. Rowe R.K., Armitage H.H. A design method for drilled piers in soft rock // Canadian Geotechnical Journal. 1987. Vol. 24. Issue 1. Pp. 126–142. DOI: 10.1139/t87-011

20. Axtell P. Combined Side and Base Resistance in Rock-Socketed Drilled Shafts — a State of the Art Consensus // DFI Journal The Journal of the Deep Foundations Institute. 2022. Vol. 16. Issue 2. DOI: 10.37308/dfjnl.20221115.267

Поступила в редакцию 19 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Григорьевич Зерцалов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3862-4166, Scopus: 6602162286, ORCID: 0000-0003-2841-1023; mzertsalov@yandex.ru;

Дарья Александровна Силантьева — аспирант, преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8733-3463, ORCID: 0009-0009-5741-5526; silantevada@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Зерцалов М.Г. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в анализе результатов и формулировке выводов.

Силантьева Д.А. — проведение физического и численного моделирования, подготовка текста, анализ результатов и формулировка выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Bryksina A.A. Evaluation of the pile bearing capacity in rock interbedded by cohesion soils under vertical loading. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022; 3(34):7-25. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25. EDN UXPEZG. (rus.).

2. Zertsalov M.G. Geomechanics. *Introduction to the mechanics of rocky soils*. Moscow, ASV, 2014; 352. EDN TBDUEH. (rus.).

3. Hoek E., Kaiser P.K. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, 1995.

4. Zhang L. Drilled Shafts in Rock. *Analysis and Design*. London, CRC Press, 2004; 396. DOI: 10.1201/9780203024423

5. Zhang L. Analysis and Design of Axially Loaded Drilled Shafts Socketed in Rock. *Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering at MIT*. 1997; 167.

6. Ilinov M.D., Korshunov V.A., Posphekhov G.B., Shokov A.N. Integrated experimental research of mechanical properties of rocks: problems and solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2023; 5:11-18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02. EDN KWXDVA. (rus.).

7. Razvodovsky D., Skorikov A. Problems and possible ways of development of pile design building codes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020; 3(26):74-85. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85. EDN KZYBMU. (rus.).

8. Kuznetsov N.N. Investigation of strength properties and specific strain energy of rocks under triaxial compression. *Russian Mining Industry*. 2025; 2:140-145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145. EDN SOYEYH. (rus.).

9. Sharafutdinov R.F., Botanin D.P. Study of the side resistance of bored piles in rock. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 4:9-16. EDN GAMNLY. (rus.).

10. Sharafutdinov R.F., Shulyat'ev O. A., Isaev O.N., Zakatov D.S. Studies of interaction of drilled piles with

rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 5:11-16. EDN SQVSIM. (rus.).

11. Shulyat'ev O.A., Sharafutdinov R.F., Shulyat'ev S.O. Generalization of the test results of bored piles in rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 1:2-7. EDN PIMBDH. (rus.).

12. Oshchepkova I.A., Sychkina E.N. Problems of laboratory determination of the mechanical properties of semi-rocky Lower Permian soils in the city of Perm. *Bulletin of PG TU. Construction and Architecture*. 2011; 1:59-63. EDN OJHLTT. (rus.).

13. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods : a review. *Underground Space*. 2017; 2(1):1-15. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.03.003

14. Ye X., Tang C., Phoon K.-K., Chen J. Development and use of axial load test databases for analysis and design of soft rock sockets. *Canadian Geotechnical Journal*. 2025; 62:1-21. DOI: 10.1139/cgj-2024-0155

15. Barton N. A model study of rock-joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and*

Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972; 9(5):579-582. DOI: 10.1016/0148-9062(72)90010-1

16. Karzulovic A., Read J. Rock mass model. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. 2009; 83-139. DOI: 10.1071/9780643101104.ch05

17. Brown D.A., Turner J.P., Castelli R.J., Loehr E.J. *Drilled Shafts Construction Procedures and Design Methods: NHI Course No. 132014: Geotechnical Engineering Circular No. 10*. Washington, 2010; 970.

18. Zertalov M.G., Nikiskin M.V. International experience in designing piles in rock. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 5:120. EDN OWEBRV. (rus.).

19. Rowe R.K., Armitage H.H. A design method for drilled piers in soft rock. *Canadian Geotechnical Journal*. 1987; 24(1):126-142. DOI: 10.1139/t87-011

20. Axtell P. Combined Side and Base Resistance in Rock-Socketed Drilled Shafts — a State of the Art Consensus. *DFI Journal The Journal of the Deep Foundations Institute*. 2022; 16(2). DOI: 10.37308/dfi-jnl.20221115.267

Received October 19, 2025.

Adopted in revised form on November 7, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

B I O N O T E S : **Mikhail G. Zertsalov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3862-4166, Scopus: 6602162286, ORCID: 0000-0003-2841-1023; mzertsalov@yandex.ru;

Daria A. Silantyeva — postgraduate student, lecturer of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8733-3463, ORCID: 0009-0009-5741-5526; silantevada@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail G. Zertsalov — scientific leadership, research concept, development of methodology, participation in the analysis of results and formulation of conclusions.

Daria A. Silantyeva — carrying out physical and numerical modeling, preparing text, analyzing results and formulating conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Научные основы определения несущей способности трубобетонных колонн с учетом предельно допустимой деформации

Владимир Иванович Римшин^{1,2}, Анатолий Леонидович Кришан^{2,3},
Мария Анатольевна Астафьева^{2,3}, Михаил Алексеевич Лихидько³

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

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова);
г. Магнитогорск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сжатые трубобетонные элементы заняли достойное место в мировой практике строительства. В России также начал проявляться повышенный интерес к практическому применению трубобетонных колонн (ТБК), особенно при проектировании высотных зданий. Данные конструкции обладают такими ценными качествами, как высокая прочность и пластический характер разрушения, обусловленный большими осевыми деформациями в предельном состоянии. В действующих нормативных документах по проектированию ТБК в России, а также за рубежом содержатся только указания по расчету их прочности на основании метода предельных усилий, а в таком расчете деформативные свойства конструкций не учитываются. Несущую способность необходимо определять не только с учетом ее прочности, но и с возможной необходимостью ограничения осевой деформации. Решению этой задачи на примере центрально сжатых элементов посвящено данное исследование.

Материалы и методы. Рассмотрен расчет прочности коротких ТБК в условиях центрального сжатия по методу предельных усилий. Известно, что осевые деформации трубобетонных колонн могут достигать слишком больших величин, неприемлемых для эксплуатационной пригодности несущего каркаса. Расчет производится с возможностью ограничения предельных осевых деформаций заранее определенной величиной.

Результаты. Получена формула для установления осевых деформаций колонн в предельном состоянии по прочности, которые принимаются равными деформациям бетонного ядра при максимальных напряжениях. Проверка точности этой формулы выполнена по результатам сопоставлений вычисленных значений деформаций с опубликованными экспериментальными данными.

Выводы. Полученные зависимости позволяют оценить деформативность рассчитываемой конструкции и расширяют область применения метода предельных усилий на трубобетонные элементы, в которых предельно допустимая деформация не превышает 25 % от деформации бетонного ядра при максимальном напряжении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубобетонная колонна, центральное сжатие, прочность, предельно допустимая деформация, деформация ядра при максимальном напряжении, метод предельных усилий, осевые деформации конструкции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Римшин В.И., Кришан А.Л., Астафьева М.А., Лихидько М.А. Научные основы определения несущей способности трубобетонных колонн с учетом предельно допустимой деформации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 44–53. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.44-53

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

Scientific basis for determining the load-bearing capacity of pipe-concrete columns, taking into account the maximum permissible deformation

Vladimir I. Rimshin^{1,2}, Anatoly L. Krishan^{2,3}, Maria A. Astafieva^{2,3}, Mikhail A. Likhidko³

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

² Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture
and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

³ Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov; Magnitogorsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Compressed concrete tube elements have already earned a well-deserved place in global construction practice. In Russia, there has also been increased interest in the practical application of concrete tube columns (CTC), particularly in the design of high-rise buildings. These structures possess valuable qualities such as high strength and ductile failure due to large axial deformations in the ultimate limit state. Current design regulations for CTC in Russia, as well as internationally, only contain instructions for calculating their strength using the ultimate limit method, and this calculation does not take into account the deformation properties of the structure. Bearing capacity must be determined not only by considering its strength but also the possible need to limit axial deformation. This paper addresses this issue using centrally compressed elements as an example.

Materials and methods. The strength calculation of short concrete tube columns under central compression using the ultimate limit method is considered. It is known that axial deformations of reinforced concrete columns can reach values that are unacceptable for the serviceability of the supporting framework. The calculation is performed with the option of limiting the ultimate axial deformations to a predetermined value.

Results. A formula was derived for determining the axial deformations of columns in the ultimate limit state, which are assumed to be equal to the deformations of the concrete core under maximum stress. The accuracy of this formula was verified by comparing the calculated deformation values with published experimental data.

Conclusions. The obtained relationships allow us to estimate the deformability of the calculated structure and expand the scope of application of the ultimate stress method to reinforced concrete elements in which the ultimate allowable deformation does not exceed 25 % of the concrete core deformation under maximum stress.

KEYWORDS: concrete filled steel tube column, axial compression, strength, ultimate allowable deformation, core deformation under maximum stress, method of ultimate forces, axial deformations of the structure

FOR CITATION: Rimshin V.I., Krishan A.L., Astafieva M.A., Likhidko M.A. Scientific basis for determining the load-bearing capacity of pipe-concrete columns, taking into account the maximum permissible deformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):44-53. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.44-53 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике строительства сжатые трубобетонные элементы уже заняли достойное место [1–4]. Сейчас и в России начал проявляться повышенный интерес к практическому применению трубобетонных колонн (ТБК), особенно при проектировании высотных зданий [5, 6]. Этому способствует ряд положительных качеств таких конструкций. Наиболее ценными среди них являются высокая прочность и пластический характер разрушения, вызванный большими осевыми деформациями в предельном состоянии. Сочетание двух этих качеств обеспечивает необходимость в повышенных затратах энергии для разрушения колонн, что положительно сказывается на устойчивости зданий к прогрессирующему разрушению. Наиболее ярко отмеченные преимущества проявляются в центрально сжатых ТБК круглого сечения. При высоких напряжениях здесь создаются благоприятные условия объемного сжатия бетонного ядра. В осевом направлении сжимающие напряжения обусловлены действием внешней нагрузки, а в трансверсальном направлении — радиальными напряжениями на контакте стальной трубы-оболочки с ядром, обеспечивающими эффект косвенного армирования бетона. Это и приводит к значительному повышению прочности и предельных деформаций бетонного ядра.

Действующие нормативные документы по проектированию ТБК в России, а также Австралии, Бразилии, Европе, Канаде, КНР, США и Японии содержат указания по расчету их прочности на основании метода предельных усилий. В таком расчете деформативные свойства конструкций не учитываются. Между тем в предельном состоянии осевые деформации ТБК могут достигать 2–4 % и более [7]. Эти

деформации не позволяют обеспечивать нормальную эксплуатацию здания. Поэтому даже при расчете по предельным усилиям требуется вычислять осевые деформации конструкции. Несущую способность целесообразно определять не только с учетом ее прочности, но и с возможной необходимостью ограничения осевой деформации. Решению этой задачи на примере центрально сжатых элементов посвящена данная работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В расчете принимается допущение о совместности деформаций бетонного ядра и стальной трубы на всех стадиях напряженно-деформированного состояния ТБК вплоть до разрушения. При малых напряжениях эта совместность обеспечена сцеплением между бетоном и сталью, прочность которого в конструкциях круглого сечения из тяжелого бетона достигает 1–2 МПа [8]. К моменту преодоления сил сцепления взаимодействие между бетонным ядром и стальной трубой обусловлено силами трения, которые возникают благодаря увеличивающемуся с ростом осевых напряжений боковому давлению бетона на трубу. Коэффициент трения при этом достаточно большой — 0,5–0,6.

Из многочисленных экспериментов [8] известно, что труба уже при относительно небольших осевых деформациях, обычно находящихся в пределах $\varepsilon_{pz} = (0,85/0,95) \cdot \sigma_{y,p}/E_p$ ($\sigma_{y,p}$ — предел текучести; E_p — модуль упругости стали), переходит в состояние текучести. При дальнейшем увеличении нагрузки осевые деформации трубы следуют за деформациями бетона [9]. Поэтому в предельном состоянии

осевые деформации конструкции определяют деформации бетонного ядра.

Бетонное ядро к этому моменту находится в состоянии объемного сжатия. Диаграмму деформирования объемно сжатого бетонного ядра в расчетах стоит принимать криволинейной. Согласно исследованию [10], аналитическая зависимость связи напряжения с деформацией, наиболее близко совпадающей с опытными данными, имеет следующий вид:

$$\sigma_{bz} = \left[2 \frac{\varepsilon_{bz}}{\varepsilon_{b00}} - \left(\frac{\varepsilon_{bz}}{\varepsilon_{b00}} \right)^2 \right] \cdot R_{bp}, \tag{1}$$

где σ_{bz} и ε_{bz} — текущие напряжения и деформации бетона; ε_{b00} — деформация в вершине диаграммы объемно сжатого бетона; R_{bp} — прочность объемно сжатого бетона.

Прочность R_{bp} достаточно точно определяется по формуле, полученной в работе [11] и имеющей вид:

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

где R_b — расчетное сопротивление бетона при одноосном сжатии; $\bar{\sigma}$ — относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки

на бетонное ядро в предельном состоянии, рассчитываемая по формуле:

$$\bar{\sigma} = 0,49e^{-(a+b)}\rho^{0,8};$$

a и b — коэффициенты материала для тяжелого бетона, принимаемые $a = 0,144$ и $b = 0,288$; ρ — конструктивный коэффициент трубобетона, вычисляемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{y,p} A_p}{R_b A};$$

A_p и A — площади поперечных сечений трубы и ядра.

Для расчета деформации ε_{b00} предложено немало различных формул. Наиболее известные из них представлены в табл. 1.

По структуре приведенных формул очевиден их эмпирический характер. Все они получены для определенных условий проводимых экспериментов и поэтому имеют ограниченную область применения. Кроме того, в большинстве из них не учитывается влияние на деформации таких важных механических характеристик бетона, как его прочность при одноосном сжатии и начальный модуль упругости. Это отрицательно отражается на достоверности расчетов.

Теоретически более обоснованную формулу можно получить из сопоставления диаграмм дефор-

Табл. 1. Предлагаемые формулы для расчета осевых деформаций бетона

Table 1. Suggested formulas for calculating axial deformations of concrete

Автор формулы, источник The author of the formula, the source	Формула Formula
J. Mander, M. Priestley, R. Park [12]	$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(1 + k \frac{\sigma_b}{R_b} \right),$ где ε_{b0} — деформация одноосно сжатого бетона; k — коэффициент бокового давления ($k = 20,5$); σ_b — боковое давление на бетон ε_{b0} — deformation of uniaxially compressed concrete; k — lateral pressure coefficient ($k = 20,5$); σ_b — lateral pressure on concrete
I. Imran, S. Pantazopoulou [13]	$\varepsilon_{b00} = 5\varepsilon_{b0} \left(\frac{R_{bp}}{R_b} - 0,8 \right)$
S. Marques, D. Marques, J. Silva [14]	$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(1 + 5k_1 k_2 \frac{\sigma_b}{R_b} \right);$ $k_1 = 6,7\sigma_b^{-0,17}; k_2 = 40/R_b \leq 1$
A. Xiamuxi, A. Hasegawa [7]	$\varepsilon_{b00} = k_{eb} \varepsilon_{b0};$ $k_{eb} = 0,94e^{3,9\gamma_p}; \gamma_p = \frac{N_p}{N_p + N_b};$ $N_p = R_p A_p; N_b = R_b A_b,$ где R_p, R_b — расчетные сопротивления трубы и бетона сжатию; A_p, A_b — площади сечения трубы и бетона R_p, R_b — calculated resistance of pipe and concrete to compression; A_p, A_b — cross-sectional areas of pipe and concrete
Ding F., Yu Z., Bai Y., Gong Y. [15]	$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(1 + 3,4 \frac{\sigma_b}{R_b} \right) \left[1 + 4,8 (A_1 - 1) \left(\frac{\sigma_b}{R_b} \right)^{0,5} \right];$ $A_1 = 9,1R_b^{-4,9}$

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

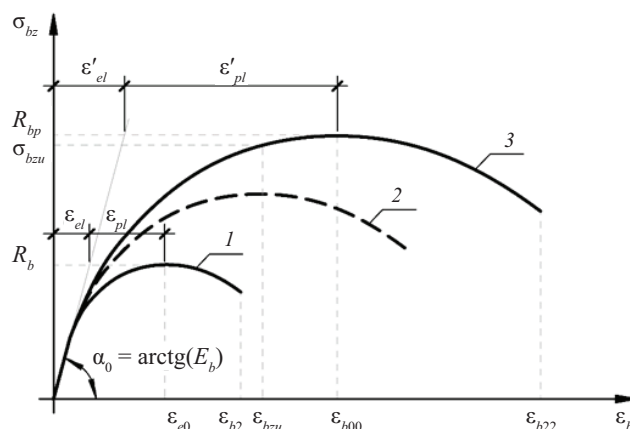
Автор формулы, источник The author of the formula, the source	Формула Formula
Liang Q.Q., Fragomeni S. [9]	$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(1 + k \frac{\sigma_b}{R_b} \right),$ $\sigma_b = \begin{cases} 0,7(v_e - v_s) \frac{2t}{D-2t} R_p, & \text{если / when } \frac{D}{t} \leq 47 \\ (0,006241 - 0,0000357 \frac{D}{t}) R_p, & \text{если / when } 47 \leq \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases};$ $\varepsilon_{b0} = \begin{cases} 0,002, & \text{если / when } \gamma_c R_b \leq 28 \text{ МПа / МПа} \\ 0,002 + \frac{R_b - 28}{54000}, & \text{если / when } 28 \text{ МПа} \leq R_b \leq 82 \text{ МПа / МПа} \\ 0,003, & \text{если / when } R_b \geq 28 \text{ МПа / МПа} \end{cases}$ где v_e, v_s — коэффициент Пуассона для трубобетонного элемента и полой стальной трубы согласно работе [15] v_e, v_s — Poisson's ratio for a pipe-concrete element and a hollow steel pipe, respectively, according to [15]

мирования одноосно и трехосно сжатого бетонного ядра трубобетонного элемента (рис.). С ростом осевых напряжений диаграмма деформирования бетонного ядра постепенно трансформируется. До осевых напряжений $\sigma_{bz} = (0,5/0,6)R_b$ бетон находится в условиях одноосного сжатия. В таких условиях реализуется диаграмма 1. Обусловлено это тем, что в квазиупругой стадии работы (при $\sigma_{bz} \leq 0,4R_b$) прочности R_{bp} , коэффициент поперечных деформаций бетона меньше, чем у стальной трубы. В результате радиальное напряжение на контакте бетона со стальной оболочкой отсутствует. При дальнейшем росте напряжений σ_{bz} в бетоне наблюдается интенсивный процесс микротрещинообразования, что приводит к постепенному росту коэффициента его поперечных деформаций. Когда значение этого коэффициента становится больше коэффициента Пуассона стальной трубы бетонное ядро переходит в состоя-

ние трехосного сжатия. В этом состоянии с постепенным ростом радиального напряжения увеличиваются прочность и предельная деформативность бетона, что приводит к постоянной трансформации диаграммы его деформирования. В результате можно построить множество промежуточных диаграмм 2, каждая из которых связывает текущие деформации с соответствующими напряжениями в бетонном ядре. К моменту разрушения объемно сжатого бетона напряжение в вершине диаграммы достигнет прочности R_{bp} , а соответствующая деформация — величины ε_{b00} .

Полные деформации бетона в вершине диаграммы одноосного сжатия ε_{b0} упрощенно представим в виде суммы упругой ε_{el} и пластической ε_{pl} деформации:

$$\varepsilon_{b0} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$



Диаграммы деформирования бетонного ядра в условиях одноосного сжатия (1) и трехосного сжатия в промежуточном (2) и предельном (3) состояниях

Deformation diagrams of a concrete core under uniaxial compression (1) and triaxial compression in the intermediate (2) and ultimate (3) states

Деформацию бетона ε_{b00} при напряжении R_{bp} можно записать через аналогичные составляющие:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{el,3} + \varepsilon_{pl,3}. \tag{3}$$

Важно заметить, что для рассматриваемых диаграмм начальный модуль упругости бетона E_b один и тот же. Поэтому величины упругих деформаций ε_{el} и $\varepsilon_{el,3}$ прямо пропорционально зависят от R_b и R_{bp} , так как $\varepsilon_{el} = R_b/E_b$ и $\varepsilon_{el,3} = R_{bp}/E_b$.

Логично предположить, что соотношение пластических деформаций $\varepsilon_{el,3}$ и ε_{pl} также зависит от отношения R_{bp} к R_b . Из многочисленных экспериментов известно, что увеличение предельных деформаций бетона при объемном сжатии по сравнению с одноосным сжатием заметно выше, чем прирост его прочности. Например, европейские нормы EN 1992-1-1 и EN 1994-1-1 предлагают использовать в расчетах следующую формулу:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^2. \tag{4}$$

Следовательно, пластические деформации $\varepsilon_{el,3}$ с ростом напряжений от R_b до R_{bp} увеличиваются более интенсивно, чем упругие. Тогда связь деформаций $\varepsilon_{pl,3}$ и ε_{pl} можно представить в виде зависимости, имеющей вид:

$$\varepsilon_{pl,3} = \varepsilon_{pl} \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^n, \tag{5}$$

где $n > 1$.

Формулу (5) можно записать и так:

$$\varepsilon_{pl,3} = \left(\varepsilon_{b0} - \frac{R_b}{E_b} \right) \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^n.$$

Уравнение (3) после подстановки в него упругой и пластической составляющих деформаций имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{b00} = \frac{R_{bp}}{E_b} + \left(\varepsilon_{b0} - \frac{R_b}{E_b} \right) \cdot \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^n. \tag{6}$$

После введения обозначения $\alpha_b = R_{bp}/R_b$ формулу (6) можно записать так:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \alpha_b^n - \frac{R_b}{E_b} (\alpha_b^n - \alpha_b). \tag{7}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная формула принципиально верно отражает физический смысл процесса деформирования объемно сжатого бетона. Учтено влияние на величину ε_{b00} основных факторов, а именно:

- деформации бетона в вершине соответствующей диаграммы при одноосном сжатии ε_{b0} ;
- соотношения прочностей R_{bp}/R_b ;
- прочности бетона при осевом сжатии R_b ;
- начального модуля упругости бетона E_b .

Деформацию ε_{b0} и начальный модуль упругости E_b (МПа) для тяжелого бетона можно определять в зависимости от его класса по прочности на сжатие B ($15 \leq B \leq 100$) по следующим формулам [8]:

$$\varepsilon_{b0} = (1,2 + 0,16 \sqrt{B})/1000;$$

$$E_b = (55\,250 - 122\,000/\sqrt{B}) \cdot \beta,$$

где β — коэффициент, учитывающий вид крупного заполнителя.

Показатель степени n для коэффициента α_b определяется по результатам анализа опубликованных экспериментальных данных [7, 8, 16–20]. Статистическая обработка этих данных показала, что наи-

Табл. 2. Сопоставление теоретических и опытных деформаций

Table 2. Comparison of theoretical and experimental deformations

Ссылка Link	Номер Number	D , мм mm	t , мм mm	R_p , МПа MPa	R_b , МПа MPa	R_{b3} , МПа MPa	ε_{b0} , %	ε_{b00}^{exp} , %	$\varepsilon_{b00}^{exp} / \varepsilon_{b00}^{th1}$	$\varepsilon_{b00}^{exp} / \varepsilon_{b00}^{th2}$
[23]	1	153	1,5	345	53,4	72,9	0,237	0,481	1,05	1,09
	2	250	2,5	326	53,4	72,0	0,237	0,457	1,03	1,06
	3	372	3,6	320	53,4	71,6	0,237	0,387	0,88	0,91
	4	469	4,7	291	53,4	70,6	0,237	0,405	0,95	0,98
	5	157	2,5	326	53,4	79,2	0,237	0,564	1,01	1,08
	6	282	4,4	322	53,4	78,6	0,237	0,477	0,87	0,93
	7	153	3,6	320	53,4	87,5	0,237	0,591	0,83	0,93
	8	235	5,7	290	53,4	85,6	0,237	0,582	0,86	0,96

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Ссылка Link	Номер Number	D , мм mm	t , мм mm	R_p , МПа MPa	R_b , МПа MPa	R_{b3} , МПа MPa	ε_{b0} , %	$\varepsilon_{b00}^{\text{exp}}$, %	$\varepsilon_{b00}^{\text{exp}}/\varepsilon_{b00}^{\text{th1}}$	$\varepsilon_{b00}^{\text{exp}}/\varepsilon_{b00}^{\text{th2}}$
[7]	9	150	1,2	304	24,7	36,7	0,200	0,600	1,10	1,37
	10	150	1,2	323	29,8	42,9	0,207	0,580	1,13	1,34
	11	150	3,2	299	14,4	33,3	0,181	2,550	1,34	2,65
	12	150	3,2	314	20,1	42,1	0,192	1,730	1,19	2,06
	13	150	4,5	296	14,4	38,0	0,181	2,700	0,94	2,15
[21]	14	165,2	3,7	366	31,6	61,2	0,210	0,870	0,75	1,11
	15	165,2	3,7	366	41,3	73,9	0,223	0,820	0,90	1,15
	16	165,2	3,7	366	56,2	92,4	0,240	0,690	0,96	1,06
	17	230	2,3	361	23,6	38,9	0,198	0,670	0,92	1,25
[22]	18	100	1,9	282	58,3	85,5	0,242	0,573	1,06	1,10
	19	150	1,9	282	58,3	78,7	0,242	0,540	1,21	1,23
	20	200	1,9	282	58,3	74,8	0,242	0,445	1,11	1,12
	21	250	1,9	282	58,3	72,4	0,242	0,450	1,21	1,21
	22	100	2,0	404	58,3	94,5	0,242	0,625	0,91	0,98
	23	150	2,0	404	58,3	85,6	0,242	0,575	1,06	1,10
	24	200	2,0	404	58,3	80,6	0,242	0,464	0,98	1,00
	25	250	2,0	404	58,3	77,3	0,242	0,405	0,94	0,95
	26	150	2,0	404	61,2	88,9	0,245	0,464	0,88	0,90
[15]	27	300	2,0	341,7	25,1	36,5	0,200	0,380	0,73	0,90
	28	219	4,7	350	36,3	65,8	0,216	0,980	1,03	1,38
	29	165	2,7	350	53,5	81,5	0,237	0,900	1,51	1,64
	30	200	3,0	303,5	41,6	63,5	0,223	0,535	0,89	1,03
	31	100	3,0	303,5	41,6	77,1	0,223	1,100	1,09	1,44
	32	179	5,5	249	37,1	67,6	0,218	0,750	0,77	1,04
	33	174	3,0	266	38,5	60,0	0,219	0,510	0,80	0,96
Среднее значение / Average value									1,00	1,21
Стандартное отклонение / Standard deviation									0,17	0,39
Медиана / Median									0,96	1,09

лучшему соответствию экспериментам отвечает значение $n = 3,2$. Однако следует заметить, что вопрос о назначении величины показателя степени n нуждается в дополнительном исследовании.

В табл. 2 приведены результаты сопоставления теоретических деформаций $\varepsilon_{b00}^{\text{th1}}$, вычисленных по формуле (7), с опытными $\varepsilon_{b00}^{\text{exp}}$, опубликованными в исследованиях [7, 15, 21–23]. Анализ полученных результатов свидетельствует об удовлетворительном соответствии теоретических значений опытными данным. Величина стандартного отклонения 17 % при среднем значении отношения $\varepsilon_{b00}^{\text{exp}}/\varepsilon_{b00}^{\text{th1}}$, рав-

ном 1, для деформаций является вполне приемлемой. Для сравнения здесь же приведены результаты сопоставлений с экспериментами значений деформаций $\varepsilon_{b00}^{\text{th2}}$, вычисленных по формуле (4). Очевидно, что использование формулы EN 1994-1-1 приводит к большим погрешностям в расчете. Основная причина данного факта — игнорирование влияния прочности и модуля упругости исходного бетона.

Если не учитывать возможное ограничение осевых деформаций ТБК, то их несущую способность (в таком случае прочность) можно установить с использованием метода предельных усилий. При осе-

вом сжатии прочность может быть рассчитана по формуле:

$$N = R_{bp}A + \sigma_{pz}A_p, \quad (8)$$

где σ_{pz} — сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе.

Прочность объемно сжатого бетона R_{bp} можно определить по формуле (2). Для расчета сжимающего напряжения в стальной трубе σ_{pz} в работе [8] получена формула:

$$\sigma_{pz} = R_b \frac{A}{A_p} (\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma}).$$

В предельном состоянии напряжения в бетоне R_{bp} и стали σ_{pz} рассчитываются в зависимости от относительной величины бокового давления $\bar{\sigma}$, что соответствует фактическому характеру силового сопротивления конструкции.

При необходимости ограничения осевой деформации предлагается действовать согласно следующим рекомендациям:

- если предельно допустимая деформация ε_{bzu} , назначаемая проектировщиком по результатам статического расчета несущего каркаса здания или сооружения, составляет менее 75 % от деформации ε_{b00} , достоверный расчет по предельным усилиям затруднителен и следует переходить к деформационному расчету прочности;
- при $0,75\varepsilon_{b00} \leq \varepsilon_{bzu} \leq \varepsilon_{b00}$ необходимо определить максимально допустимые осевые напряжения в бетонном ядре σ_{bzu} по формуле:

$$\sigma_{bzu} = \left[2 \frac{\varepsilon_{bzu}}{\varepsilon_{b00}} - \left(\frac{\varepsilon_{bzu}}{\varepsilon_{b00}} \right)^2 \right] \cdot \gamma_b R_{bp}. \quad (9)$$

Коэффициент γ_b учитывает следующее обстоятельство. При деформации $\varepsilon_{bzu} < \varepsilon_{b00}$ точка с соответствующим ей напряжением $\sigma_{bzu} < R_{bp}$ не лежит на кривой 3 (см. рис.), а принадлежит некой графической зависимости $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$, располагаемой немного

ниже. Координаты вершины этой промежуточной зависимости при использовании метода предельных усилий рассчитать невозможно, так как они будут зависеть от бокового давления, величина которого неизвестна. По результатам численного анализа, выполненного с помощью нелинейной деформационной модели, для нахождения коэффициента γ_b получена формула:

$$\gamma_b = 0,75 + 0,25 \left(\frac{\varepsilon_{bzu}}{\varepsilon_{b00}} \right)^2.$$

Напряженное состояние стальной трубы-оболочки в диапазоне деформаций $0,75\varepsilon_{b00} \leq \varepsilon_{bzu} < \varepsilon_{b00}$ изменяется незначительно. Сжимающее напряжение σ_{pz} при таких деформациях можно принять постоянным. В этой связи определение несущей способности центрально сжатой ТБК при необходимости ограничения осевой деформации выполняется по формуле (9) с заменой R_{bp} на полученное значение σ_{bzu} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочность центрально сжатых ТБК можно с достаточной для практики точностью устанавливать по методу предельных усилий. Однако при определенных конструктивных параметрах такие элементы к моменту разрушения могут иметь слишком большие осевые деформации, неприемлемые для проектируемых объектов. Предложенные в работе формулы позволяют оценить деформативность рассчитываемой конструкции. Кроме того, предлагаемая методика расширяет область применения метода предельных усилий на ТБК, в которых деформации бетонного ядра при максимальном напряжении превышают предельно допустимую деформацию не более чем на 25 %. Если имеет место большее превышение вычисленной деформации над предельно допустимой рекомендуется переходить к расчету несущей способности с использованием деформационной модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bhure N. Steel Concrete Composite Construction : a Review // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2018. Vol. 6. Issue 11. Pp. 564–566. DOI: 10.22214/ijraset.2018.11089
2. Chen L., Fakharian P., Eidgahee D.R., Haji M., Arab A.M.A., Nouri Y. Axial compressive strength predictive models for recycled aggregate concrete filled circular steel tube columns using ANN, GEP, and MLR // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 77. P. 107439. DOI: 10.1016/j.job.2023.107439
3. Hossain K.M.A., Chu K., Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations // Infrastructures. 2021. Vol. 6. Issue 5. P. 66. DOI: 10.3390/infrastructures6050066
4. Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental investigation on octagonal concrete filled steel stub columns under uni-axial compression // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 147. Pp. 457–467. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.030
5. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 437–449. EDN WFKVPH.
6. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного из-

гиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 66–72. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71. EDN ANFJDO.

7. Xiamuxi A., Hasegawa A. A study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns // Journal of Constructional Steel Research. 2012. Vol. 76. Pp. 144–154. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.03.023

8. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. М. : Издательство АСВ, 2020. 321 с.

9. Liang Q.Q., Fragomeni S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under axial loading // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65. Issue 12. Pp. 2186–2196. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.06.015

10. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 100. Pp. 211–228. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016

11. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Лихидько М.А. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 8. С. 1154–1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164. EDN WVLQYX.

12. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete // Journal of Structural Engineering. 1988. Vol. 114. Issue 8. Pp. 1804–1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)

13. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress // ACI Materials Journal. 1996. Vol. 93. Issue 6. DOI: 10.14359/9865

14. Marques S.P.C., Marques D.C.D.S.C., da Silva L.J., Cavalcante M.A.A. Model for Analysis of Short Columns of Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymer // Journal of Composites for Construction. 2004. Vol. 8. Issue 4. Pp. 332–340. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:4(332)

15. Ding F., Yu Z., Bai Y., Gong Y. Elasto-plastic analysis of circular concrete-filled steel tube stub col-

umns // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 10. Pp. 1567–1577. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.04.001

16. Wang Y., Chen P., Liu C., Zhang Y. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression // Thin-Walled Structures. 2017. Vol. 120. Pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.010

17. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-JAPAN Cooperative Research Program on composite and hybrid structures. Japan, 2002. 176 p.

18. Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Yai B. Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design // Engineering Structures. 2019. Vol. 179. Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081

19. Samarakkody D.I., Thambiratnam D.P., Chan T.H., Moragaspitiya P.H. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 143. Pp. 659–672. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091

20. Lai M.H., Ho J.C.M. A theoretical axial stress-strain model for circular concrete-filled-steel-tube columns // Engineering Structures. 2016. Vol. 125. Pp. 124–143. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.048

21. He L., Lin S., Jiang H. Confinement Effect of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Infill Concrete of Different Strength Grades // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 6. DOI: 10.3389/fmats.2019.00-071

22. Han L.H., Yao G.H., Zhao X.L. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC) // Journal of Constructional Steel Research. 2005. Vol. 61. Issue 9. Pp. 1241–1269. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.01.004

23. Wang Y., Chen P., Liu C., Zhang Y. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression // Thin-Walled Structures. 2017. Vol. 120. Pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.010

Поступила в редакцию 12 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Иванович Римшин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального хозяйства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; SPIN-код: 9629-5322, РИНЦ ID: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000000290844105; v.rimshin@niisf.ru;

Анатолий Леонидович Кришан — главный научный сотрудник лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и строительства зданий, советник РААСН; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; SPIN-код: 8162-5048, РИНЦ ID: 535561, Scopus: 56200412900, ResearcherID: AAY-2235-2020, ORCID: 000000025851152X; kris_al@mail.ru;

Мария Анатольевна Астафьева — старший научный сотрудник лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; SPIN-код: 3756-6776, РИНЦ ID: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021, ORCID: 0000-0003-1354-0324; skymanika@mail.ru;

Михаил Алексеевич Лихидько — аспирант кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; SPIN-код: 5186-8602, РИНЦ ID: 1038214, likhidkom@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bhure N. Steel Concrete Composite Construction : a Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2018; 6(11):564-566. DOI: 10.22214/ijraset.2018.11089
2. Chen L., Fakharian P., Eidgahee D.R., Haji M., Arab A.M.A., Nouri Y. Axial compressive strength predictive models for recycled aggregate concrete filled circular steel tube columns using ANN, GEP, and MLR. *Journal of Building Engineering*. 2023; 77:107439. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107439
3. Hossain K.M.A., Chu K., Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations. *Infrastructures*. 2021; 6(5):66. DOI: 10.3390/infrastructures6050066
4. Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental investigation on octagonal concrete filled steel stub columns under uniaxial compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 147:457-467. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.030
5. Vedernikova A.A. Development and implementation of the concrete filled steel tube elements inverse numerical-analytical method. *Engineering journal of Don*. 2023; 11(107):437-449. EDN WFKVPH. (rus.).
6. Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental study of longitudinal and transverse bending of pipe concrete rods. *Housing Construction*. 2023; 12:66-72. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71. EDN ANFJDO. (rus.).
7. Xiamuxi A., Hasegawa A. A study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012; 76:144-154. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.03.023
8. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Compressed Pipe Concrete Elements. *Theory and Practice*. Moscow, ASV Publishing House, 2020; 321. (rus.).
9. Liang Q.Q., Fragomeni S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under axial loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009; 65(12):2186-2196. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.06.015
10. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 100:211-228. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016
11. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A., Likhidko M.A. Strength of centrally compressed concrete tube elements. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(8):1154-1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164. EDN WVLQYX. (rus.).
12. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988; 114(8):1804-1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)
13. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress. *ACI Materials Journal*. 1996; 93(6). DOI: 10.14359/9865
14. Marques S.P.C., Marques D.C.D.S.C., da Silva L.J., Cavalcante M.A.A. Model for Analysis of Short Columns of Concrete Confined by Fiber-Reinforced

Polymer. *Journal of Composites for Construction*. 2004; 8(4):332–340. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:4(332)

15. Ding F., Yu Z., Bai Y., Gong Y. Elasto-plastic analysis of circular concrete-filled steel tube stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(10):1567–1577. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.04.001

16. Wang Y., Chen P., Liu C., Zhang Y. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2017; 120:397–407. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.010

17. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. *Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-JAPAN Cooperative Research Program on composite and hybrid structures*. Japan, 2002; 176.

18. Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Yai B. Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design. *Engineering Structures*. 2019; 179:268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081

19. Samarakkody D.I., Thambiratnam D.P., Chan T.H., Moragaspiya P.H. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns. *Construction and Building Materials*. 2017; 143:659–672. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091

20. Lai M.H., Ho J.C.M. A theoretical axial stress-strain model for circular concrete-filled-steel-tube columns. *Engineering Structures*. 2016; 125:124–143. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.048

21. He L., Lin S., Jiang H. Confinement Effect of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Infill Concrete of Different Strength Grades. *Frontiers in Materials*. 2019; 6. DOI: 10.3389/fmats.2019.00071

22. Han L.H., Yao G.H., Zhao, X.L. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*. 2005; 61(9):1241–1269. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.01.004

23. Wang Y., Chen P., Liu C., Zhang Y. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2017; 120:397–407. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.010

Received November 12, 2025.

Adopted in revised form on November 18, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

B I O N O T E S : **Vladimir I. Rimshin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; Head of the Laboratory Monitoring of Housing and Communal Services and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238; Russian Federation; SPIN-code: 9629-5322, ID RSCI: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000000290844105; v.rimshin@niisf.ru;

Anatoly L. Krishan — Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238; Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Construction of Buildings, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov**; 38 Lenin st., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; SPIN-code: 8162-5048, ID RSCI: 535561, Scopus: 56200412900, ResearcherID: AAY-2235-2020, ORCID: 000000025851152X; kris_al@mail.ru;

Maria A. Astafieva — Senior Researcher of the Laboratory Monitoring of Housing and Communal Services and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238; Russian Federation; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Construction of Buildings; **Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov**; 38 Lenin st., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; SPIN-code: 3756-6776, ID RSCI: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021, ORCID: 0000-0003-1354-0324; skymanika@mail.ru;

Mikhail A. Likhidko — postgraduate student of the Department of Design and Construction of Buildings; **Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov**; 38 Lenin st., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; SPIN-code: 5186-8602, ID RSCI: 1038214; likhidkom@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Влияние погрешностей изготовления квадратных профилей на прочность контактного соединения колонн

Александр Романович Туснин, Иван Владимирович Мыльников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние погрешностей изготовления стальных гнутых замкнутых сварных квадратных профилей размером 200 × 8 мм на прочность монтажного контактного стыка колонн по высоте. Предполагается, что допустимые отклонения размеров выпускаемого стального проката приняты в национальных стандартах с учетом обеспеченности заданного уровня надежности, равного 95,44 %.

Материалы и методы. Исследуются законы распределения для таких случайных величин, как толщина листа t , высота профиля h и радиус наружного закругления R . Для учета погрешностей изготовления элементов при определении несущей способности узла при центральном сжатии колонны предлагается ввести понижающий коэффициент условий работы γ_{σ} , вычисляемый как отношение порогового значения площади контакта A'_{cont} к нормативной площади сечения профиля колонны A_n .

Результаты. В зависимости от значений t , h , R для нижней и верхней колонн формируются площади их поперечного сечения (A_1 и A_2), а также площадь их контакта A_{cont} при условии симметричности погрешностей изготовления и соосной установке колонн в ходе монтажа. Написана программа на языке Python для генерации возможных значений площади контакта A_{cont} , подбора аппроксимирующей функции и вычисления коэффициента условий работы γ_{σ} .

Выводы. В результате исследований с использованием метода Монте-Карло установлено, что при учете влияния погрешностей изготовления для толщины листа t , высоты профиля h и радиуса наружного закругления R прочность контактного стыка колонн при центральном сжатии может снижаться до 84 % от расчетной прочности, установленной по площади поперечного сечения, указанной в сортаменте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальной каркас, контактные соединения, быстросборный узел, стык колонн, квадратные сварные профили, погрешности изготовления, коэффициент условий работы, метод Монте-Карло

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Мыльников И.В. Влияние погрешностей изготовления квадратных профилей на прочность контактного соединения колонн // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 54–66. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.54-66

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Мыльников, miv_2499@mail.ru.

The production inaccuracies' influence of square profiles on the strength of the contact joint of columns

Aleksandr R. Tusnin, Ivan V. Mylnikov

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

ABSTRACT

Introduction. The production inaccuracies' influence of steel bent closed welded square profiles with a size of 200 × 8 mm on the strength of the mounting contact joint of columns in height is considered. It is assumed that the permissible deviations in the size of the rolled steel produced are accepted in the standards, taking into account the provision of a given level of reliability equal to 95.44 %.

Materials and methods. The distribution laws for such random variables as sheet thickness t , profile height h and radius of the outer rounding R are investigated. To account for the production inaccuracies of the elements when determining the bearing capacity of a node under central compression, it is proposed to introduce a reducing coefficient of operating conditions γ_{σ} , calculated as the ratio of the threshold value of the contact area A'_{cont} to the standard cross-sectional area of the column profile A_n .

Results. Depending on the values of t , h , and R for the lower and upper columns, their cross-sectional areas (A_1 and A_2) are formed, as well as their contact area A_{cont} , provided that the production inaccuracies are symmetrical and the columns are installed coaxially during installation. The program has been written in Python to generate possible values of the contact area A'_{cont} , select an approximating function and calculate the coefficient of operating conditions γ_{σ} .

Conclusions. As a result of research using the Monte Carlo method, it was found that, taking into account the influence of the production inaccuracies for sheet thickness t , profile height h , and outer rounding radius R , the strength of the column contact joint under central compression can decrease to 84 % of the calculated strength based on the cross-sectional area specified in the grade.

KEYWORDS: steel frame, contact joints, quick assembly unit, column joint, square welded profiles, production inaccuracies, coefficient of working conditions, Monte Carlo method

FOR CITATION: Tusnin A.R., Mylnikov I.V. The production inaccuracies' influence of square profiles on the strength of the contact joint of columns. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):54-66. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.54-66 (rus.).

Corresponding author: Ivan V. Mylnikov, miv_2499@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим стальные колонны из гнутых замкнутых сварных квадратных профилей 200×8 мм, изготовленных по ГОСТ 30245–2003¹. Указанное сечение ввиду наличия двух осей симметрии, большой прочности и жесткости достаточно часто встречается в практике проектирования гражданских зданий со стальными каркасами.

Гнутые сварные квадратные трубы получают из листовой заготовки путем профилирования нужного сечения с последующим выполнением продольного сварного шва. После этого производится подрезка по длине и обработка поверхности. Принятый профиль выпускается из стального листа толщиной 8 мм (по ГОСТ 19903–2015²); класс точности изготовления листа Б (обычной точности); ширина исходной листовой заготовки 1250 мм [1–4].

Рассмотрим контактный стык двух колонн из квадратного профиля. Такой узел может применяться как монтажный при устройстве каркасов многоэтажных зданий. Для исключения смещения верхней части колонны относительно нижней используются внутренние направляющие пластины (рис. 1), установленные так, чтобы при вариации размеров сечений в пределах допусков производства квадратных труб была возможна установка частей колонн друг на друга.

В таком соединении продольное усилие N и изгибающий момент M передаются непосредственно через контакт торцевых сечений нижней и верхней частей колонны. Для обеспечения прочности и облегчения монтажа важно понимать, насколько отличаются друг от друга поперечные сечения нижней и верхней колонн в стыке. Изменение размеров сечения в пределах допусков уменьшает контактную площадь, что влияет на прочность стыка.

В данной статье исследуется влияние погрешностей изготовления колонн из стальных гнутых замкнутых сварных профилей 200×8 мм на возможность выполнения контактного узла стыка колонн по высоте. Разработанная методика оценки площади контакта в монтажном стыке может применяться и для квадратных гнутосварных профилей других размеров. При оценке влияния погрешностей произ-

водства квадратных профилей использованы следующие предположения:

- погрешности симметричны относительно обеих осей симметрии;
- колонны из стальных квадратных профилей устанавливаются друг на друга соосно; дополнительные погрешности из-за неточности монтажа, такие как боковые и угловые смещения, не рассматриваются.

На рис. 2 показана схема формирования площади контакта двух профилей.

В стандартах указаны допуски на предельные отклонения размеров стальной продукции в зависимости от ее вида. С учетом того, что квадратные трубы производятся из листовой стали, необходимо принять во внимание погрешности изготовления и стальных листов, и погрешности формирования замкнутых стальных квадратных труб. В ГОСТ 19903–2015 приведены допустимые погрешности изготовления для листового проката, в ГОСТ 30245–2003 — для квадратных профилей.

Данные ограничения приняты исходя из требований к качеству строительного стального проката, которое зависит от ряда факторов:

- 1) технико-экономических расчетов (баланса безопасности и экономики);
- 2) технологической осуществимости (возможностей промышленного оборудования);
- 3) международного опыта производства (совместимости с мировыми практиками);

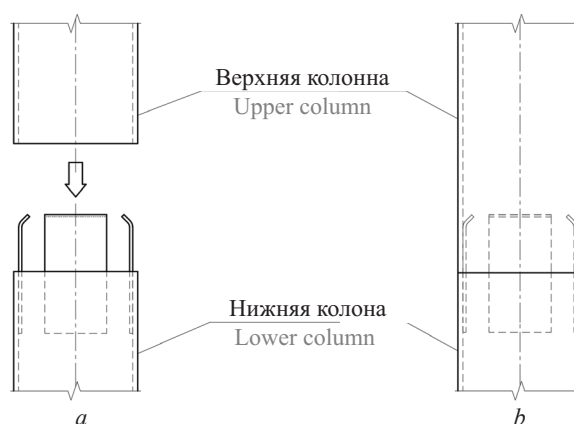


Рис. 1. Контактный стык колонн из квадратных труб с направляющими пластинами: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

Fig. 1. Contact joint of columns made of square profiles with guide plates: *a* — disassembled; *b* — assembled

¹ ГОСТ 30245–2003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия.

² ГОСТ 19903–2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.

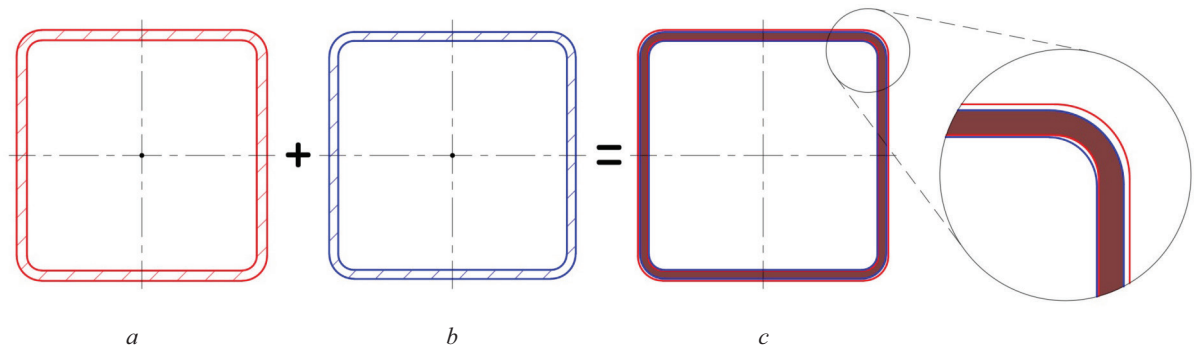


Рис. 2. Схема формирования площади контакта торцов: *a* — сечение нижней колонны; *b* — сечение верхней колонны; *c* — площадь контакта торцов при соосном совмещении сечений двух профилей

Fig. 2. The scheme of the formation of the contact area of the ends: *a* — the section of the lower column; *b* — the section of the upper column; *c* — the contact area of the ends when the sections of the two profiles are coaxially aligned

4) эксплуатационных факторов (нагрузок, коррозионных рисков, точности монтажа).

В стандартах на производимую продукцию указывается диапазон основных параметров профиля (толщины стенки, высоты профиля, радиуса наружного закругления). Наличие диапазона контролируемых параметров позволяет осуществлять отбраковку некачественной продукции. Указанные в стандартах параметры профиля представляют собой математическое ожидание толщины стенки, высоты профиля, радиуса наружного закругления соответственно. Например, для указанного в ГОСТ 30245–2003 типоразмера квадратного стального профиля 200 × 8 мм математическое ожидание высоты профиля $\bar{h} = 200,0$ мм, а толщины $\bar{t} = 8,0$ мм [5–8].

Математически изменение параметров можно выразить следующим образом. Пусть $f(x)$ — функция распределения плотности вероятности параметра x , непрерывная на интервале $(-\infty; \infty)$. Площадь под графиком функции $f(x)$, определенной на всей числовой оси, равна 1.

Учитывая ограничения, устанавливаемые нормами на изготовление, область определения функции $f(x)$ сокращается до отрезка $[a, b]$. В этом случае площадь под графиком функции $f(x)$, определенной на отрезке $[a, b]$, равна $P(x) = 0,9544$, что соответству-

ет вероятности изготовления на заводе продукции, удовлетворяющей требованиям стандартов [9–13].

Будем считать, что вероятность поступления в продажу некачественной продукции равна 0 и все изделия без исключения удовлетворяют требованиям на указанные в ГОСТах допуски. Тогда вероятность поставки и использования продукции с параметром x , значение которого принадлежит регламентированному интервалу $[a, b]$, равна 100 %. В этом случае выражение функции плотности распределения вероятности, определенной на отрезке $[a, b]$, умножается на коэффициент $c > 1$, т.е. $c \cdot f(x)$. Площадь под графиком будет $P_c(x) = 1$.

Значение масштабного коэффициента c определяется выражением:

$$c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx}{\int_a^b f(x) dx} = \frac{1}{0,9544} = 1,04778 \approx 1,05. \quad (1)$$

На рис. 3 показано непрерывное полное распределение продукции $f(x)$ с параметром x до отбраковки, предельные допуски на изготовление в пределах $2\sigma_x$ и усеченное распределение $c \cdot f(x)$ после отбраковки [14–23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Погрешности изготовления стального листа $t = 8$ мм (по ГОСТ 19903–2015)

В общем случае стальные листы изготавливаются в соответствии с нормальным законом распределения.

Для листов толщиной от 7,5 до 10,0 мм при ширине проката от 1000 до 1500 мм и класса точности изготовления Б указаны допуски $-0,80$ мм и $+0,30$ мм. Это означает, что значение t будет принадлежать отрезку $[7,2; 8,3]$ мм.

Данный интервал несимметричен относительно своего математического ожидания $\bar{t} = 8,0$ мм. Слева и справа от $\bar{t}$ откладываются разные среднеквадратические отклонения: $\sigma_{t1} = 0,4$ мм и $\sigma_{t2} = 0,15$ мм.

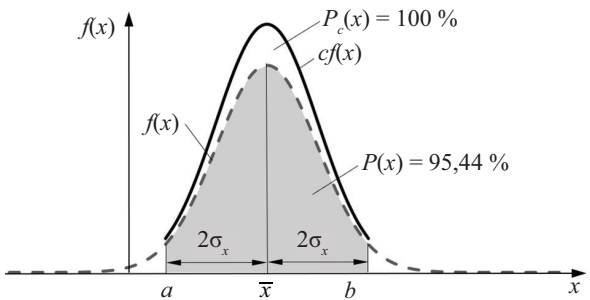


Рис. 3. Плотность полного $f(x)$ и усеченного $c \cdot f(x)$ распределения случайной величины x

Fig. 3. Density of the entire $f(x)$ and limited $c \cdot f(x)$ distribution of the random variable x

Для того чтобы подобрать закон распределения, сформулированы необходимые условия:

- область определения $[7,2; 8,3]$;
- математическое ожидание равно 8,0;
- площадь под графиком полученной ограниченной функции равна 1;
- площадь под графиком на отрезке $[7,2; 8,0]$ (слева от математического ожидания) и $[8,0; 8,3]$ (справа от математического ожидания) равна 0,5. Это условие позволяет получать значения как больше, так и меньше 8,0 с одинаковой вероятностью.

Заданным условиям удовлетворяет бета-распределение. Для задания функции выполнен переход к единичному отрезку:

$$x = \frac{t-7,2}{8,3-7,2} \in [0; 1]; \quad t = 7,2 + 1,1x. \quad (2)$$

На отрезке $[0; 1]$ плотность распределения задана как:

$$g(x) = \frac{1}{Z(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}. \quad (3)$$

В этой формуле величина $Z(\alpha, \beta)$ называется нормировочной константой, которая вычисляет-

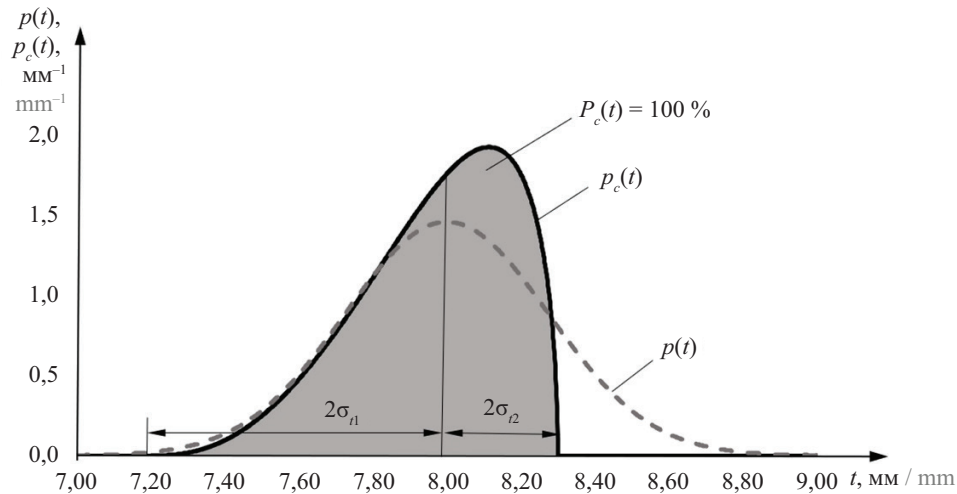


Рис. 4. Нормальное распределение общего вида $p(t)$ и ограниченное бета-распределение $p_c(t)$ плотности вероятности для толщины стенки t квадратного профиля 200×8 мм

Fig. 4. The normal distribution of the general form $p(t)$ and the limited probability density beta-distribution $p_c(t)$ for the wall thickness t of a 200×8 mm square profile

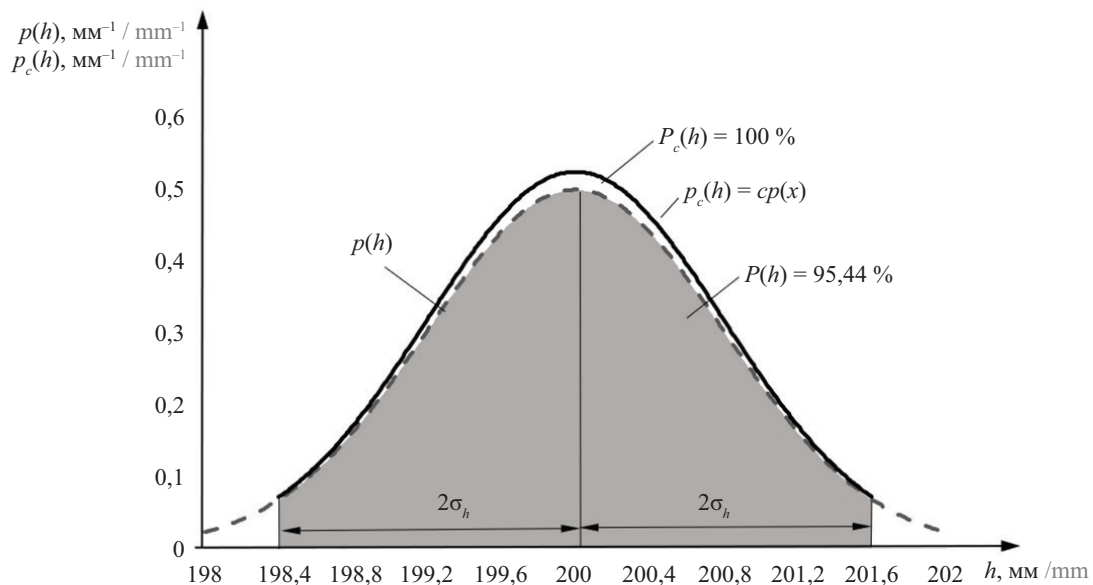


Рис. 5. Плотность нормального $p(h)$ и усеченного нормального $p_c(h)$ распределения высоты h квадратного профиля 200×8 мм

Fig. 5. Probability density entire and limited normal distributions for the height of a 200×8 mm square profile

ся как бета-функция, зависит от параметров α, β и определяется через интеграл:

$$Z(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx. \tag{4}$$

Полученное бета-распределение выглядит следующим образом:

$$p_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{(8,3 - 7,2)^8} g\left(\frac{t - 7,2}{8,3 - 7,2}\right) = \\ = \frac{1}{1,1 Z(\alpha, \beta)} \left(\frac{t - 7,2}{1,1}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{t - 7,2}{1,1}\right)^{\beta-1} & \text{при } 7,2 \leq t \leq 8,3; \\ 0 & \text{при } t < 7,2 \text{ и } t > 8,3. \end{cases} \tag{5}$$

Параметры, которые точно удовлетворяют заданным условиям: $\alpha = 3,51, \beta = 1,51$. График функции представлен на рис. 4.

Погрешности изготовления квадратного профиля 200 × 8 по высоте (по ГОСТ 30245–2003)

При изготовлении квадратных профилей высотой более 100 мм погрешности по высоте (ширине) составляют ±0,8 % h , т.е. для номинальной высоты профиля 200,0 мм фактическое значение h будет принадлежать отрезку [198,4; 201,6] мм.

Распределение плотности вероятности высоты сечения профиля симметричное, принимаем его усеченным нормальным (рис. 5). После отбраковки на заводе-производителе вероятность попадания случайной величины в указанный интервал составляет 100 %. Усеченный нормальный закон распределения плотности вероятности для параметра h выглядит следующим образом:

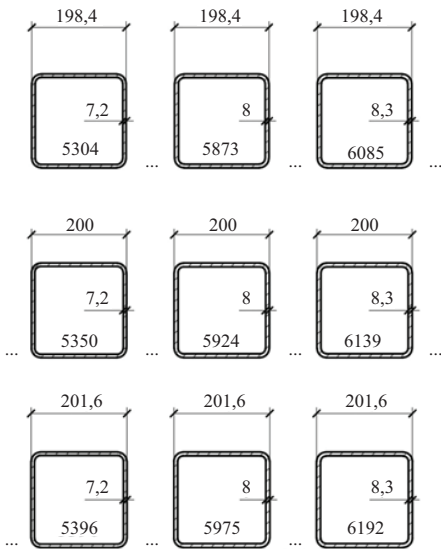


Рис. 6. Некоторые возможные варианты поперечных сечений при погрешностях изготовления стального листа по толщине и квадратного профиля по высоте

Fig. 6. Some possible cross-sectional variants for production inaccuracies of steel sheet in thickness and square profile in height

$$p_c(h) = \begin{cases} \frac{1,05}{\sigma_h \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-\bar{h})^2}{2\sigma_h^2}} & \text{при } 198,4 \leq h \leq 201,6; \\ 0 & \text{при } h < 198,4 \text{ и } h > 201,6. \end{cases} \tag{6}$$

где $\bar{h} = 200,0$ мм — математическое ожидание; $\sigma_h = 0,8$ мм — среднеквадратическое отклонение величины h .

Приведены некоторые комбинации в размерах сечений (рис. 6). Внутри сечений показаны полученные площади поперечного сечения в мм².

Погрешности изготовления квадратного профиля 200 × 8 по радиусу наружного закругления (по ГОСТ 30245–2003)

При изготовлении квадратных профилей при $6,0 < t < 10,0$ мм допустимые значения радиуса наружного закругления R принадлежат отрезку [16,0; 24,0] мм.

Распределение плотности вероятности радиуса наружного закругления симметричное, принимаем его усеченным нормальным (рис. 7). После отбраковки на заводе-производителе вероятность попадания случайной величины в указанный интервал составляет 100 %. Усеченный нормальный закон распределения плотности вероятности для параметра R выглядит так:

$$p_c(R) = \begin{cases} \frac{1,05}{\sigma_R \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-\bar{R})^2}{2\sigma_R^2}} & \text{при } 16,0 \leq R \leq 24,0; \\ 0 & \text{при } R < 16,0 \text{ и } R > 24,0. \end{cases} \tag{7}$$

где $\bar{R} = 20,0$ мм — математическое ожидание; $\sigma_R = 2,0$ мм — среднеквадратическое отклонение величины R .

Приведены некоторые комбинации в размерах сечений (рис. 8). Внутри сечений показаны полученные площади поперечного сечения в мм².

Определение коэффициента условий работы γ_d

Производство квадратных стальных профилей неизбежно связано с погрешностями изготовления. При решении контактной задачи двух фрезерованных торцов эти факторы нельзя игнорировать.

Предельная расчетная продольная нагрузка P для рассматриваемого контактного стыка колонн определяется из условия прочности колонны для центрального сжатия в упругой стадии: $P = A_n R_y$.

Данная формула включает в себя площадь нетто сплошного сечения колонны и не учитывает передачу продольного усилия через неидеальный контакт двух торцов. Как было показано выше, площадь контакта может быть как больше, так и меньше площади сечения нетто.

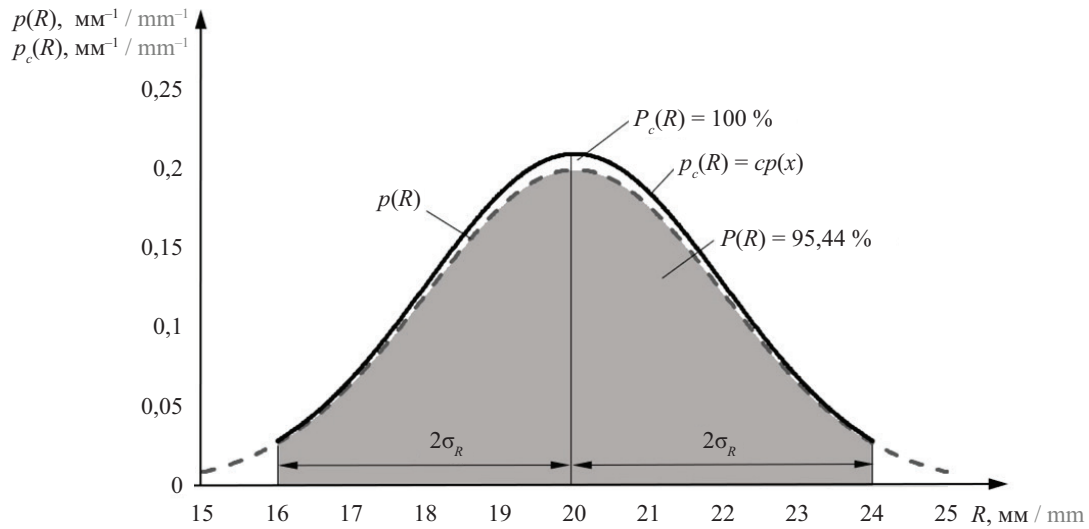


Рис. 7. Плотность нормального $p(R)$ и усеченного нормального $p_c(R)$ распределения радиуса наружного закругления R квадратного профиля 200×8 мм

Fig. 7. Probability density entire and limited normal distributions for the radius of the outer rounding of a 200×8 mm square profile

Обеспеченность безотказной работы узла принимается равной 0,95. Это и есть вероятность того, что во время работы контактного стыка колонн площадь контакта торцов A'_{cont} превышает минимально допустимый уровень A'_{cont} .

Для того чтобы учесть погрешности изготовления элементов при определении несущей способности узла, предлагается ввести понижающий коэффициент условий работы γ_d , вычисляемый как отношение порогового значения площади контакта A'_{cont} к нормативной площади сечения профиля колонны A_n :

$$\gamma_d = \frac{A'_{cont}}{A_n}. \quad (8)$$

В итоге получаем выражение для назначения предельно допустимой продольной нагрузки при центральном сжатии на контактный монтажный узел:

$$P = \gamma_d A_n R_y = A'_{cont} R_y. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения площади контакта торцов труб при различных значениях параметров $t_1, h_1, R_1, t_2, h_2, R_2$, поиска аппроксимирующей функции A_{cont} и коэффициента условий работы γ_d написана программа на языке Python, реализующая метод Монте-Карло. Работа узла описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин по принятым законам распределения, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются требуемые вероятностные характеристики.

На рис. 9 схематично показано положение рассматриваемых площадей на узле как функций нескольких переменных.

На рис. 10 показана блок-схема работы программы.

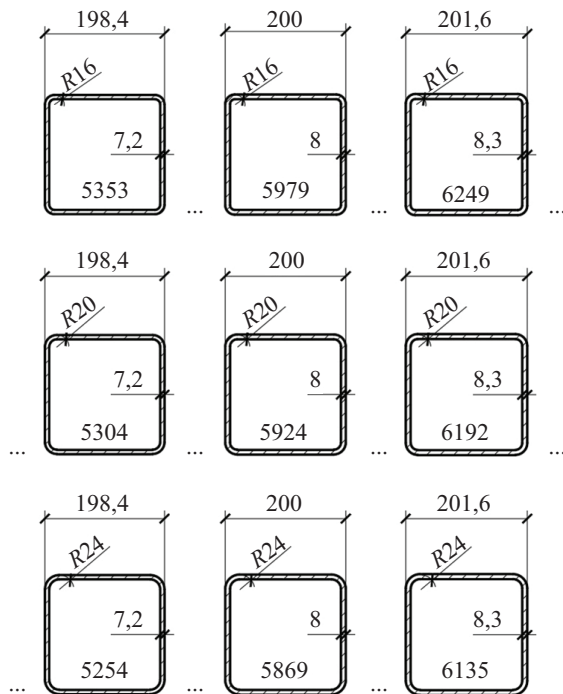


Рис. 8. Некоторые возможные варианты поперечных сечений при погрешностях изготовления стального листа, квадратного профиля по высоте и радиусу наружного закругления

Fig. 8. Some possible cross-sectional variants for production inaccuracies of steel sheet in thickness, square profile in height and radius of the outer rounding

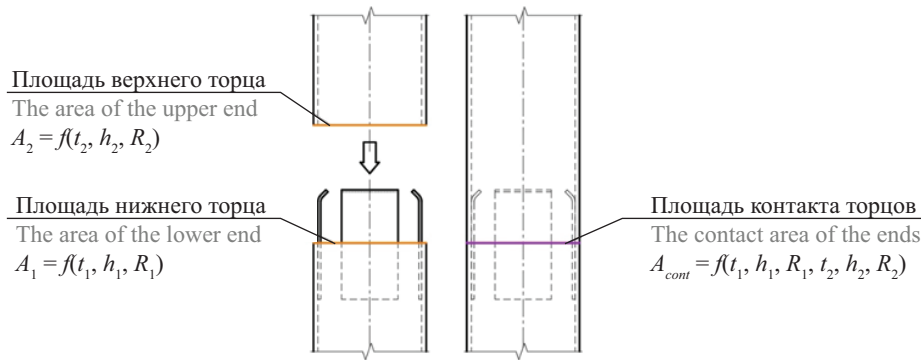
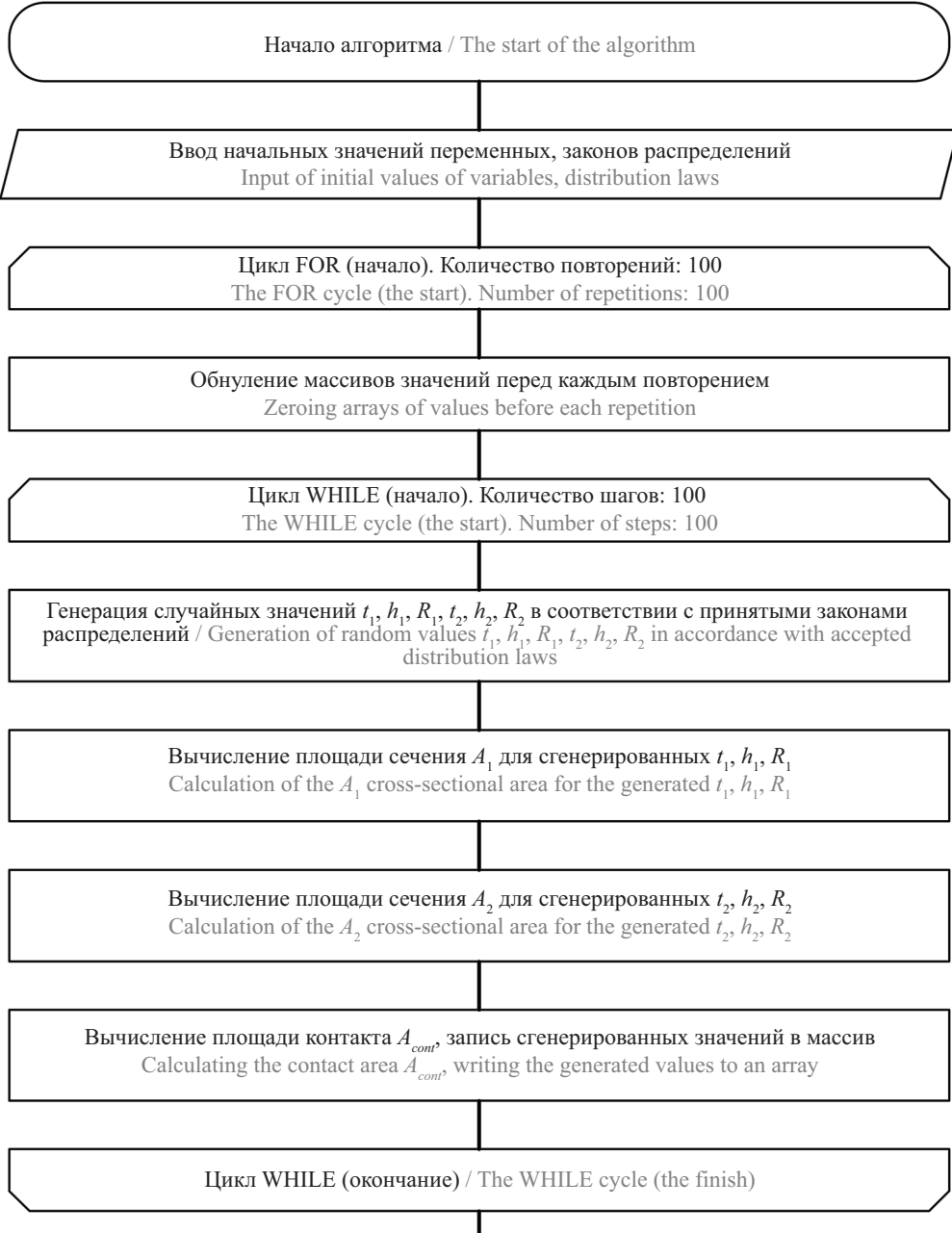


Рис. 9. Схема расположения рассматриваемых площадей на узле как функций нескольких переменных

Fig. 9. The scheme of the considered areas on the node as functions of several variables



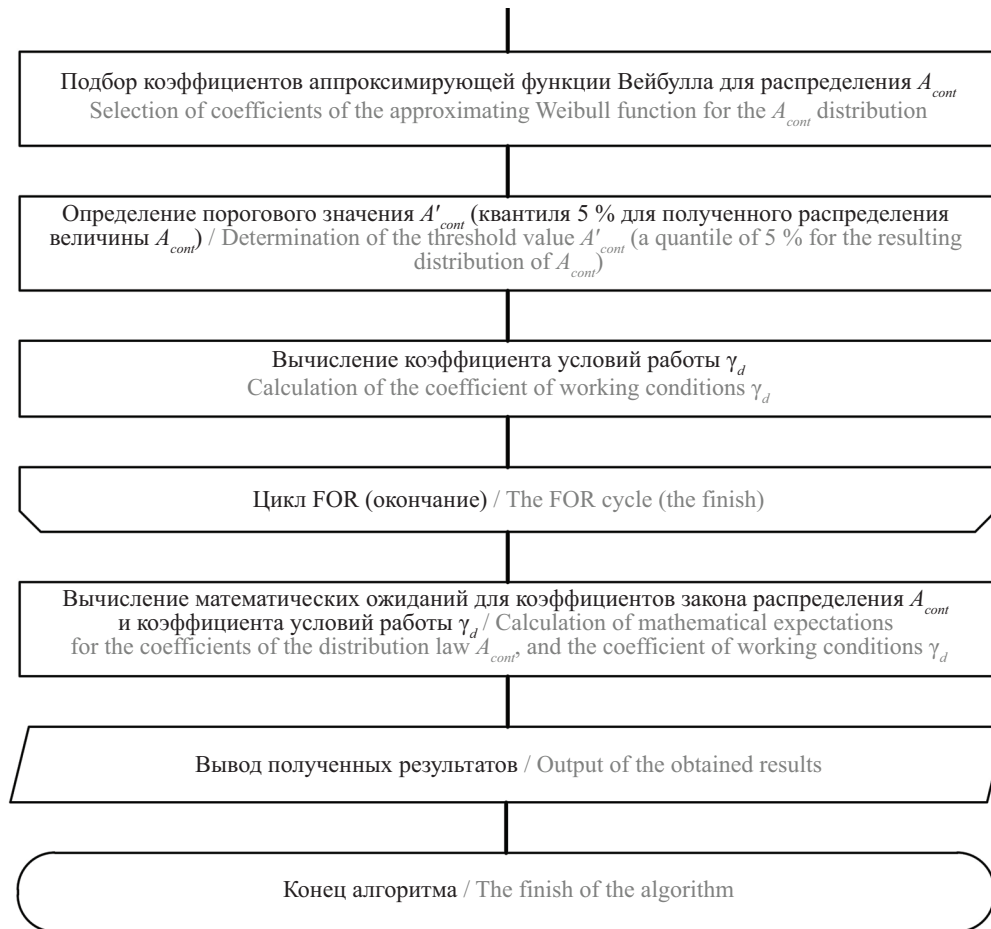


Рис. 10. Блок-схема работы программы

Fig. 10. Block diagram of the program operation

При работе программы реализуется следующая последовательность действий:

1. Загружаются необходимые данные для решения библиотеки.

2. Вводятся начальные значения переменных, параметры используемых законов распределений случайных величин (бета-распределения — для t , нормального распределения — для h и R).

3. Для реализации метода Монте-Карло формируется цикл for, количество повторений принимается равным 100.

4. С целью выполнения серии независимых расчетов выполняется очистка заполняемых массивов данных.

5. Формируется цикл while, количество шагов принимается равным 10 000.

6. Для каждой колонны задаются параметры t , h , R (с индексом «1» — для нижней колонны, с индексом «2» — для верхней колонны). На каждом шаге цикла генерируются случайные значения шести параметров t_1 , h_1 , R_1 , t_2 , h_2 , R_2 в соответствии с используемыми законами распределений.

7. На каждом шаге цикла для сечения каждой колонны при случайной комбинации входных пара-

метров t , h и R с помощью координатного метода задается контур сечения: по заданным формулам определяются координаты точек, по которым строится каждый многоугольник (полигон). Он представляет собой два ломаных замкнутых многоугольника, которые позволяют аппроксимировать реальное сечение с криволинейными секторами прямыми отрезками. На рис. 11 показана схема такой аппроксимации путем разбивки кругового сектора величиной 90° на 6 частей (по 15°). При таком упрощении полученное значение площади отличается от точного значения всего на 0,15 %. В таблице приведены формулы для определения координат вершин многоугольников, формирующих наружную и внутреннюю границы сечения профиля колонны.

8. На каждом шаге цикла устанавливается площадь поперечного сечения нижней и верхней колонны (A_1 и A_2), а также площадь их пересечения (площадь контакта A_{cont}) для сгенерированных параметров t_1 , h_1 , R_1 , t_2 , h_2 , R_2 .

9. В результате работы цикла while получается массив из значений площади контакта торцов A_{cont} .

10. Так как исходные параметры подчиняются разным типам распределений, то результирующий

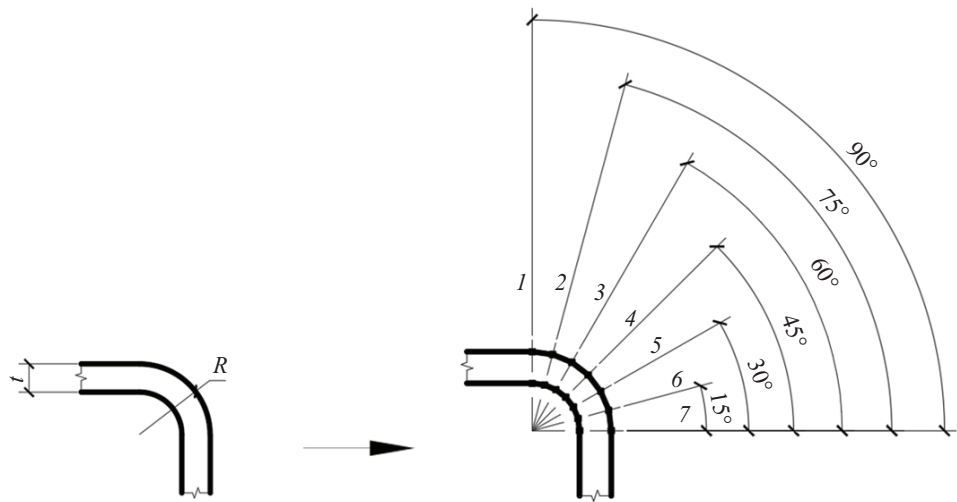


Рис. 11. Схема линейной аппроксимации криволинейного сектора профиля
Fig. 11. The scheme of linear approximation of the curved sector of the profile

Формулы для определения координат вершин многоугольников, формирующих наружную и внутреннюю поверхности профиля колонны
Formulas for determining the coordinates of the vertices of polygons forming the outer and inner surfaces of the column profile

Контур Contour	Точка Point	Абсцисса X Abscissa X	Ордината Y Ordinate Y
Наружный External	1	$\frac{h}{2} - R$	$\frac{h}{2}$
	2, 3, 4, 5, 6	$\frac{h}{2} - R \cdot \left(1 - \cos \frac{m\pi}{12}\right),$ $m = 5, 4, 3, 2, 1$	$\frac{h}{2} - R \cdot \left(1 - \sin \frac{m\pi}{12}\right),$ $m = 5, 4, 3, 2, 1$
	7	$\frac{h}{2}$	$\frac{h}{2} - R$
Внутренний Internal	1	$\frac{h}{2} - R$	$\frac{h}{2} - t$
	2, 3, 4, 5, 6	$\frac{h}{2} - R + (R - t) \cdot \left(1 - \cos \frac{5\pi}{12}\right),$ $m = 5, 4, 3, 2, 1$	$\frac{h}{2} - R + (R - t) \cdot \left(1 - \sin \frac{5\pi}{12}\right),$ $m = 5, 4, 3, 2, 1$
	7	$\frac{h}{2} - t$	$\frac{h}{2} - R$

закон для полученных данных A_{cont} можно определить только методом подбора кривой по гистограмме. Наиболее точное описание данных дает распределение Вейбулла, на этом этапе подбираются его коэффициенты k, λ, θ , которые заполняют массивы значениями.

11. На каждом повторении для подобранной функции распределения случайной величины A_{cont} определяется квантиль, при котором вероятность превышения A'_{cont} будет равна 0,95.

12. Вычисляется коэффициент условий работы γ_d , значения вносятся в массив.

13. После завершения работы цикла for вычисляются математические ожидания для коэффициен-

тов закона распределения (k, λ, θ) и коэффициента условий работы γ_d , результаты выводятся на печать.

Формула для полученного распределения Вейбулла выглядит следующим образом:

$$p(A_{cont}) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{A_{cont} - \theta}{\lambda} \right)^{k-1} \cdot \exp \left(- \frac{A_{cont} - \theta}{\lambda} \right), \quad (10)$$

где $k = 58,903$; $\lambda = 13\,056,885$; $\theta = -7434,884$ мм²; $A_{cont} > \theta$ (значения параметров k, λ, θ равны вычисленным соответствующим математическим ожиданиям).

На рис. 12 представлена гистограмма и кривая распределения полученных значений площади контакта торцов A_{cont} .

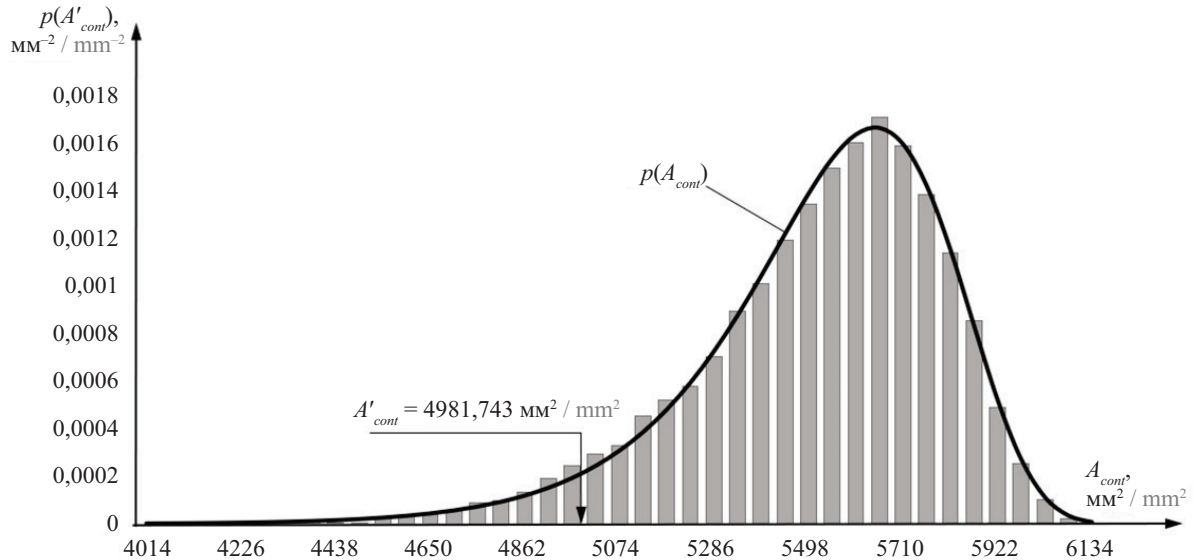


Рис. 12. Гистограмма и кривая распределения полученных значений площади контакта торцов A_{cont}

Fig. 12. The histogram and distribution curve of the obtained values of the contact area of the ends of A_{cont}

На каждом повторении цикла было вычислено пороговое значение A'_{cont} , при котором вероятность превышения равна 0,95, или $P(A'_{cont} < A_{cont}) = 0,95$. Математическое ожидание равно $\bar{A}'_{cont} = 4981,743 \text{ мм}^2$ (см. рис. 12).

Принимаемый коэффициент условий работы равен математическому ожиданию из вычисленных значений:

$$\gamma_d = \frac{\bar{A}'_{cont}}{A_n} = \frac{4981,743}{5924} \approx 0,84. \quad (11)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- подобраны законы распределения для таких параметров, как толщина стенки профиля t (бета-распределение), высота профиля h и радиус наружного закругления R (нормальное распределение);
- с учетом отбраковки полученные распределения были усечены, непрерывные в положительной области распределения определены в пределах границ, заданных в ГОСТах;

- разработана программа в среде Python для определения площади контакта торцов колонн A_{cont} , которая на примере квадратного гнутосварного профиля $200 \times 8 \text{ мм}$ позволила сгенерировать 1 000 000 значений площади контакта с учетом варьирования толщины стенки, высоты профиля и радиуса наружного закругления;

- подобран закон, который наиболее точно описывает полученный массив данных A_{cont} ; оптимальной оказалась кривая, подчиняющаяся распределению Вейбулла;

- предложена формула для вычисления предельно допустимой продольной нагрузки на контактный стык колонн с учетом понижающего коэффициента условий работы γ_d . Для квадратного гнутосварного профиля $200 \times 8 \text{ мм}$ в результате реализации метода Монте-Карло установлена величина коэффициента условий работы γ_d , равная 0,84;

- предложенная методика определения несущей способности контактного стыка может быть использована для других квадратных гнутосварных профилей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.В. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования : уч. для вузов. М. : Перо, 2023. 464 с.
2. Хлопонин В.Н., Полухин П.И., Погоржельский В.И., Полухин В.П. Горячая прокатка широких полос. М. : Металлургия, 1991. 197 с.
3. Салганик В.М., Румянцев М.И. Технология производства листовой стали : уч. пособие. Магнитогорск : МГТУ, 2007. 319 с.

4. Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 5451. DOI: 10.3390/app11125451
5. Благодарцев И.В., Шемишурова Н.Г., Куницын Д.А. Совершенствование технологии производства прямошовных сварных профильных труб // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2012. № 4 (1348). С. 94–100. EDN NPONXM.

6. Михалкин Д.В., Корсаков А.А., Алютина Е.В., Алещенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В. и др. Повышение точности труб путем применения профилированной трубной заготовки // *Металлург*. 2020. № 4. С. 40–45. EDN QFZYNC.

7. Kut S., Stachowicz F. Cross-section deformation and bending moment of a steel square tubular section // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5170. DOI: 10.3390/ma13225170

8. Kilz J., Güngör B., Aign F., Groche P. Profile defects caused by inhomogeneous longitudinal strain distribution in roll forming // *International Journal of Material Forming*. 2023. Vol. 16. Issue 4. DOI: 10.1007/s12289-023-01762-3

9. 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.

10. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки*. 2014. № 8. С. 27–34. EDN TPKRAN.

11. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений. М.: Издательство АСВ, 2018. 394 с.

12. Song I., Park S.R., Yoon S. Probability and Random Variables: Theory and Applications. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

13. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Болдырева О.Н. Оценка надежности строительных металлоконструкций методом статистического моделирования // *Конструкции из композиционных материалов*. 2011. № 1. С. 31–34. EDN NCPTHD.

14. Олейникова С.А. Аппроксимация закона распределения суммы случайных величин, распределенных по закону бета // *Кибернетика и програм-*

мирование. 2015. № 6. С. 35–54. DOI: 10.7256/2306-4196.2015.6.17225. EDN VHWSGZ.

15. Luengo E.A., Gragera C. Critical analysis of beta random variable generation methods // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Issue 24. P. 4893. DOI: 10.3390/math11244893

16. Orlov A.I. Statistical analysis of samples from the beta distribution // *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023. No. 187. Pp. 184–206. DOI: 10.21515/1990-4665-187-017. EDN RDTMOQ.

17. Тырсин А.Н. Метод подбора наилучшего закона распределения непрерывной случайной величины на основе обратного отображения // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2017. Т. 9. № 1. С. 31–38. DOI: 10.14529/mmph170104. EDN XRFRL.

18. Thomopoulos N.T. Probability distributions. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-76042-1

19. Fang K.W. Symmetric multivariate and related distributions. Chapman and Hall/CRC, 2018.

20. Костин В.Н. Результаты анализа законов распределения погрешностей измерений астронавигационных систем // *Навигация и гидрография*. 2018. № 54. С. 30–37. EDN MMVKYP.

21. Рыхлов А.Б. Анализ применения законов распределения для выравнивания скоростей ветра // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле*. 2010. Т. 10. № 2. С. 25–30. EDN NCTNCF.

22. Latour M., Benedetto S.D., Francavilla A.B., Elettore G., Rizzano G. Stiffness and strength of square hollow section tubes under localised transverse actions // *Metals*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 1767. DOI: 10.3390/met13101767

23. Song I., Park S.R., Yoon S. Probability and Random Variables: Theory and Applications. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

Поступила в редакцию 23 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7034-0713, РИНЦ ID: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; Tushinar@mgusu.ru;

Иван Владимирович Мыльников — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3437-1337, РИНЦ ID: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tikhonov S.M., Alyokhin V.N., Belyaeva Z.V. et al. Design of metal structures. Part 1: Metal structures. *Materials and fundamentals of design : textbook*. Moscow, Pero, 2023; 464. (rus.).
2. Khloponin V.N., Polukhin P.I., Pogorzelsky V.I., Polukhin V.P. *Hot rolling of wide strips*. Moscow, Metallurgy, 1991; 197. (rus.).
3. Salganik V.M., Rumyantsev M.I. *Technology of sheet steel production : tutorial*. Magnitogorsk, MSTU, 2007; 319. (rus.).
4. Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets. *Applied Sciences*. 2021; 11(12):5451. DOI: 10.3390/app11125451
5. Blagodatsev I.V., Shemshurova N.G., Kunit-syn D.A. Improvement of production technology of straight-seam welded profile pipes. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2012; 4(1348):94-100. EDN NPONXM. (rus.).
6. Mikhalkin D.V., Korsakov A.A., Al'utina E.V., Aleschenko A.S., Galkin S.P., Gamin Yu.V., Bol'nikh K. V., Krivonogov I.N., Khramkov E.V. Improving pipe accuracy by using profiled pipe billets. *Metallurgist*. 2020; 4:40-45. EDN QFZYNC. (rus.).
7. Kut S., Stachowicz F. Cross-section deformation and bending moment of a steel square tubular section. *Materials*. 2020; 13(22):5170. DOI: 10.3390/ma13-225170
8. Kilz J., Güngör B., Aign F., Groche P. Profile defects caused by inhomogeneous longitudinal strain distribution in roll forming. *International Journal of Material Forming*. 2023; 16(4). DOI: 10.1007/s12289-023-01762-3
9. 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.).
10. Nadolski V., Martynov I. Estimation of target level of reliability based on the previous experience standardization. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2014; 8:27-34. EDN TPKRAN. (rus.).
11. Raiser V.D. *Probabilistic methods in the analysis of reliability and survivability of structures*. Moscow, Publishing House ASV, 2018; 394. (rus.).
12. Song I., Park S.R., Yoon S. *Probability and Random Variables: Theory and Applications*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8
13. Gadalov V.N., Romanenko D.N., Boldyreva O.N. Estimation of reliability of building metal designs by method of statistical modeling. *Composite Materials Constructions*. 2011; 1:31-34. EDN NCPTHD. (rus.).
14. Oleinikova S.A. Approximation of the distribution law of the sum of random variables distributed according to the beta law. *Cybernetics and Programming*. 2015; 6:35-54. DOI: 10.7256/2306-4196.2015.6.17225. EDN VHWSGZ. (rus.).
15. Luengo E.A., Gragera C. Critical analysis of beta random variable generation methods. *Mathematics*. 2023; 11(24):4893. DOI: 10.3390/math11244893
16. Orlov A.I. Statistical analysis of samples from the beta distribution. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023; 187: 184-206. DOI: 10.21515/1990-4665-187-017. EDN RDTMOQ.
17. Tyrsin A.N. The method of selecting the best distribution law for continuous random variables on the basis of inverse mapping. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2017; 9(1):31-38. DOI: 10.14529/mmph170104. EDN XRFRLL. (rus.).
18. Thomopoulos N.T. *Probability distributions*. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-76042-1
19. Fang K.W. *Symmetric multivariate and related distributions*. Chapman and Hall/CRC, 2018.
20. Kostin V.N. The results of the analysis of the distribution laws of measurement errors of astronavigation systems. *Navigation and Hydrography*. 2018; 54:30-37. EDN MMVKYP. (rus.).
21. Rykhlov A.B. Analysis of the application of distribution laws to equalize wind speeds. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2010; 10(2): 25-30. EDN NCTNCF. (rus.).
22. Latour M., Benedetto S.D., Francavilla A.B., Elettore G., Rizzano G. Stiffness and strength of square hollow section tubes under localised transverse actions. *Metals*. 2023; 13(10):1767. DOI: 10.3390/met13101767
23. Song I., Park S.R., Yoon S. *Probability and Random Variables: Theory and Applications*. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

Received November 23, 2025.

Adopted in revised form on November 24, 2025.

Approved for publication on December 16, 2025.

B I O N O T E S : Aleksandr R. Tusnin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7034-0713, ID RSCI: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; Tusninar@mgsu.ru;

Ivan V. Mylnikov — postgraduate student 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; SPIN-code: 3437-1337, ID RSCI: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.022.32

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83

Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий

Ольга Александровна Туснина, Валентина Матвеевна Туснина*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проектная документация на строительство капитального объекта включает раздел, в котором обосновывается энергетическая эффективность проектируемого здания, подтверждаемая соответствием теплотехнических показателей нормам, установленным на территории России. Одним из таких теплотехнических показателей является сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций здания, характеризующее их тепловую эффективность. Нормативная методика определения этого показателя, основанная на результатах теплотехнического расчета двухмерного теплового поля, не позволяет корректно оценить тепловую эффективность конструкции, так как не позволяет учесть все проблемные места по потерям тепла из здания, имеющие место в неоднородных ограждающих конструкциях и в их узловых сопряжениях.

Материалы и методы. Рассмотрено конструктивное решение фасадной системы монолитного жилого здания с лоджиями, спроектированного для строительства в г. Москве. Наружные стены выполнены из монолитного железобетона и газобетонных блоков с применением навесной вентилируемой фасадной системы. Оценка тепловой эффективности исследуемого ограждения здания проводилась на основе теплотехнического расчета трехмерного температурного поля с использованием вычислительного комплекса TEPL.

Результаты. Приведены результаты анализа распределения температур на поверхностях теплообмена, которые позволили установить зоны излишних тепловых потерь в исследуемых конструкциях. Предложены варианты дополнительного утепления конструкций здания. С помощью программного комплекса TEPL вычислены величины приведенного сопротивления теплопередаче исследуемых ограждающих конструкций, позволившие достоверно оценить тепловую эффективность проектного конструктивного решения наружного ограждения (до утепления) и утепленных конструкций.

Выводы. Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждающих конструкций следует производить на основе численного расчета трехмерного температурного поля, позволяющего не только точно определить величину приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, но и выявить все имеющиеся в конструкции «мостики холода» для их устранения в конструктивном решении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ограждающие конструкции, тепловая эффективность, сопротивление теплопередаче, температурное поле, тепловые потери, численный метод теплотехнического расчета

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснина О.А., Туснина В.М. Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 67–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Туснина, TusninaOA@mgsu.ru.

Assessment of the thermal efficiency of external vertical building enclosures

Olga A. Tusnina, Valentina M. Tusnina*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The project documentation for the construction of a permanent structure contains a section justifying the building's energy efficiency. This justification is based on the compliance of its thermal performance parameters with the norms in force in Russia. A key parameter is the thermal of the external building envelope, which serves as a measure of its thermal effectiveness. However, the normative calculation method for this parameter, which relies on a two-dimensional heat transfer analysis, is inadequate for accurately evaluating true thermal performance. Its primary shortcoming is the inability to model all critical heat loss areas — specifically, thermal bridges present in non-uniform envelope assemblies and at structural junctions.

Materials and methods. The paper presents an analysis of the facade system design implemented in a monolithic residential building with balconies, intended for construction in Moscow. The exterior walls are constructed from monolithic reinforced concrete and autoclaved aerated concrete blocks within a ventilated facade system. Thermal performance was assessed via 3D heat transfer modelling using TEPL software.

Results. The analysis of temperature distribution on surfaces has identified specific areas of excessive heat loss within the structures. Corresponding measures for additional insulation have been developed. Calculations performed with the TEPL software package determined the design thermal resistance of the building envelope assemblies. These results provide a verified assessment of the thermal efficiency for both the original design and the proposed insulated solutions.

Conclusions. The findings advocate for a paradigm shift in practice, proposing that the thermal evaluation of external vertical enclosures should be based on 3D numerical modelling. Such an analysis provides a reliable value for the equivalent thermal resistance and, crucially, maps all thermal bridges, informing necessary design corrections to mitigate them.

KEYWORDS: enclosing structures, thermal efficiency, thermal resistance, temperature field, heat loss, numerical heat transfer analysis method

FOR CITATION: Tushina O.A., Tushina V.M. Assessment of the thermal efficiency of external vertical building enclosures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):67-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83 (rus.).

Corresponding author: Olga A. Tushina, TushinaOA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Наружные вертикальные ограждения современных зданий, формирующие их фасады, являются многослойными, неоднородными по материалу, конструктивными системами. При оценке тепловой эффективности таких ограждений ввиду многообразия их конструкций и узловых сопряжений с несущими конструктивными элементами зданий проектировщикам для каждого конкретного проектного решения необходимо выполнять теплотехнический расчет. Однако, как показывает сегодня практика проектирования и строительства зданий, корректно оценить тепловую эффективность сложных фасадных систем с теплопроводными включениями с использованием методических рекомендаций нормативных документов^{1, 2} невозможно. В теплотехническом расчете по нормативной методике, основанном на представлении фрагмента теплозащитной оболочки здания, состоящей из независимых элементов, которые влияют на тепловые потери, удельные потери теплоты, происходящие через линейную теплотехническую неоднородность, определяются по результатам расчета двухмерного температурного поля ограждающей конструкции. Приведенное сопротивление теплопередаче ограждения, полученное в результате такого расчета, ведет к значительным погрешностям в оценке тепловой эффективности многослойных неоднородных ограждений, так как не позволяет учесть влияние локальных теплопроводных включений, имеющих место в этих конструкциях.

Оценку тепловой эффективности сложных фасадных систем с теплопроводными включениями следует производить на основе численных расчетов трехмерных температурных полей с применением компьютерного моделирования. Такая методика теплотехнического расчета [1–3], в отличие от упрощенных нормативных методов, предостав-

ляет возможность не только выполнить корректный теплотехнический расчет, выявив все проблемные места по потерям тепла из здания, но и дать предложения по их устранению [4–6].

Численный метод теплотехнического расчета трехмерного температурного поля ограждения позволяет увидеть распределение температуры в конструкции на поверхностях теплообмена и установить зоны излишних тепловых потерь в ограждении, что особенно важно для многослойных конструкций наружных стен зданий, имеющих балконы, лоджии, эркеры, террасы и другие подобные помещения. Сравнительный анализ численного расчета с экспериментом в исследованиях тепловой эффективности наружных стен здания с окнами, проведенных в НИУ МГСУ [4], продемонстрировал качественную сходимость их результатов. При этом численный расчет выявил возможность снижения потерь тепла из здания на 28 % за счет утепления откосов окон. Это дало возможность почти в два раза повысить приведенное сопротивление теплопередаче стены, исключить образование конденсата на внутренней поверхности и тем самым повысить ее эксплуатационную надежность.

Корректность оценки тепловой эффективности ограждающих конструкций зданий с использованием численных методов теплотехнического расчета подтверждена многочисленными исследованиями. Авторы работы [5], разработавшие расчетную модель визуального программирования для проектирования зданий, определили эффективность численного расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Созданию энергетических трехмерных моделей зданий на основе компьютерного моделирования посвящены публикации [6, 7]. В трудах [8, 9] представлены результаты численного анализа повышения тепловой защиты здания с пассивным солнечным теплоснабжением за счет интеграции элементов активных солнечных батарей в поглощающий слой аккумулирующей ограждающей конструкции. Исследования тепловой эффективности навесной фасадной системы [10] наглядно продемонстрировали корректность результатов численного расчета конструкции, что было подтверждено данными эксперимента. Численные исследования тепловой эффективности ограж-

¹ СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. М. : Минстрой России, 2024.

² СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. М. : Минстрой России, 2015.

дающих конструкций [11] позволили выбрать наиболее оптимальные конструктивные решения наружных стен для реконструкции зданий. В статье [12] приводятся результаты численного расчета температурного поля фрагмента стеновой панели с металлическим каркасом методом конечных элементов (МКЭ). Эффективность теплотехнических расчетов трехмерных температурных полей в оценке теплотехнических свойств неоднородных конструкций ограждений подтверждают исследования, приведенные в работе [13]. Результаты численных исследований влияния геометрической формы фасадов с двойной обшивкой на теплообмен в высотных зданиях изложены в статье [14], в которой рассматриваются две модели фасадной системы — с плоскими и криволинейными поверхностями наружных стен. Численному анализу влияния тепловых мостов на сопротивление теплопередаче наружных стен посвящена публикация [15], в которой подчеркивается, что на этапе проектирования здания это влияние не следует игнорировать, так как потери тепла через эти конструктивные элементы могут быть существенными и увеличивать эксплуатационные расходы на потребление энергии. В работе [16] приведены результаты численных исследований тепловой эффективности композитных конструкций стен с воздушным зазором на основе разработанного авторами расчетного модуля с использованием MATLAB.

Вопросам точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей посвящена работа [17]. Автор анализирует особенности расчетов температурных полей. Оценка допустимых погрешностей при расчетах температурных полей приводится для конечно-разностного метода. Отмечены примеры завышения точности в нормативных документах, которые могут давать неверные результаты в оценке тепловой эффективности ограждающих конструкций здания при их проектировании. Повышению точности численных теплотехнических расчетов на основе метода конечных элементов посвящена работа [18], в которой рассма-

триваются вопросы, связанные с оценкой погрешности, вызванной дискретизацией конструкций, и предлагаются методы повышения точности результатов.

Цель настоящего исследования — оценка тепловой эффективности неоднородной конструкции наружной стены монолитного здания с лоджиями на основе теплотехнического расчета трехмерного температурного поля с использованием вычислительного комплекса (ВК) TEPL [2].

Задачи исследования:

- разработка расчетной модели исследуемой конструкции;
- численный расчет трехмерного стационарного температурного поля для рассматриваемой конструкции;
- анализ картин распределения температуры в конструкциях;
- определение приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен на основе результатов расчета трехмерного температурного поля;
- сравнительный анализ оценки тепловой эффективности конструкции стены по результатам численного расчета и расчета по нормативной методике, выполненного специалистами в расчетном обосновании энергетической эффективности проектируемого здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовалась конструкция неоднородной наружной стены монолитного жилого здания с лоджиями, спроектированного для строительства в г. Москве. Конструктивное решение стены, выполненной из газобетонных блоков с применением вентилируемой фасадной системы, изображено на рис. 1.

Теплотехнический расчет выполнен с помощью ВК TEPL [2], предназначенного для расчета трехмерных температурных полей, который позволяет определить температуру на внутренней поверхности ограждения с учетом особенностей его конструктивного решения. В данном программном комплексе

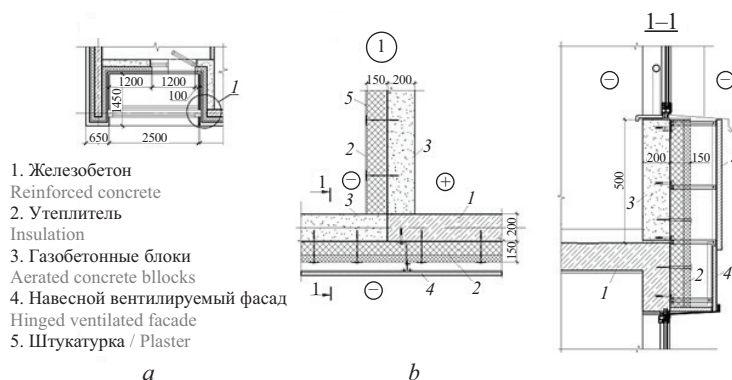


Рис. 1. Конструктивное решение наружной стены: *a* — фрагмент плана здания в месте расположения лоджии; *b* — конструкции узлов

Fig. 1. Structural design of the exterior wall: *a* — fragment of the building plan at the location of the balcony; *b* — details of the junctions

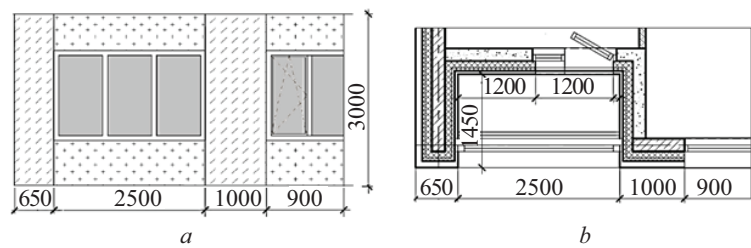
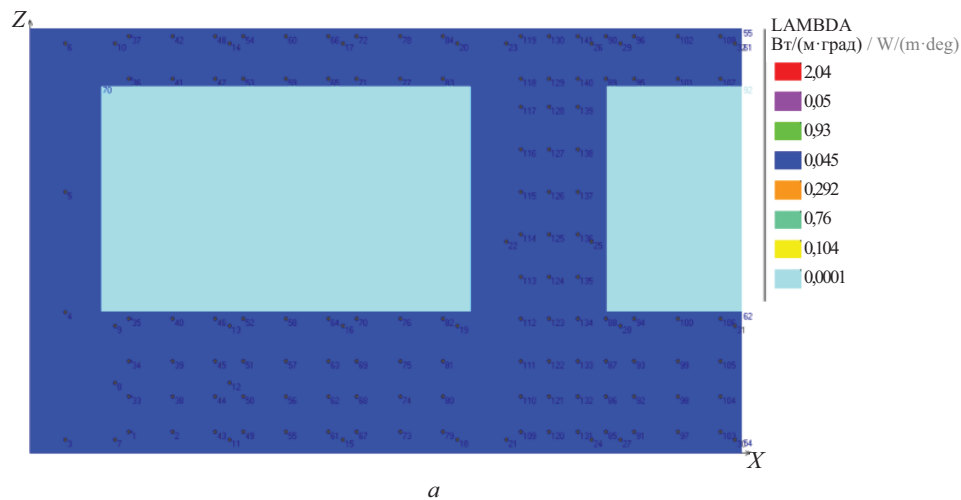


Рис. 2. Рассматриваемый участок конструкции, включенный в расчетную модель: *a* — вид на фасаде; *b* — вид на плане
Fig. 2. The analyzed structural segment incorporated into the calculation model: *a* — facade view; *b* — plan view

Табл. 1. Расчетные теплотехнические показатели строительных материалов конструкций
Table 1. Design thermal properties of construction materials

Материал Material	Теплопроводность λ, Вт/(м²·°C) Thermal conductivity λ, W/(m²·°C)	Цветовая маркировка материалов в расчетной схеме Colour marking of materials in the calculation scheme
Железобетонные стены и плиты перекрытия Reinforced concrete walls and floor slabs	2,04	
Кладка из газобетонных блоков D600 Masonry from D600 aerated concrete blocks	0,292	
Утеплитель Rockwool Венти Баттс Rockwool Venti Batts insulation	0,045	
Утепляющие вкладыши в плите перекрытия Insulating inserts in the floor slab	0,05	
Окна и балконная дверь ($R_o = 0,58 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)/Вт}$) Windows and balcony door ($R_o = 0.58 \text{ (m}^2\cdot\text{°C)/W}$)	$\lambda = \frac{\delta}{R_o} = \frac{0,06}{0,58} = 0,104$	
Штукатурная клеевая смесь СТ190 (δ = 10 мм) Plaster adhesive mixture ST190 (δ = 10 mm)	0,93	
Витражное остекление лоджии (δ = 6 мм) Stained glass glazing for a loggia (δ = 6 mm)	0,76	
Воздух Air	0,0001	



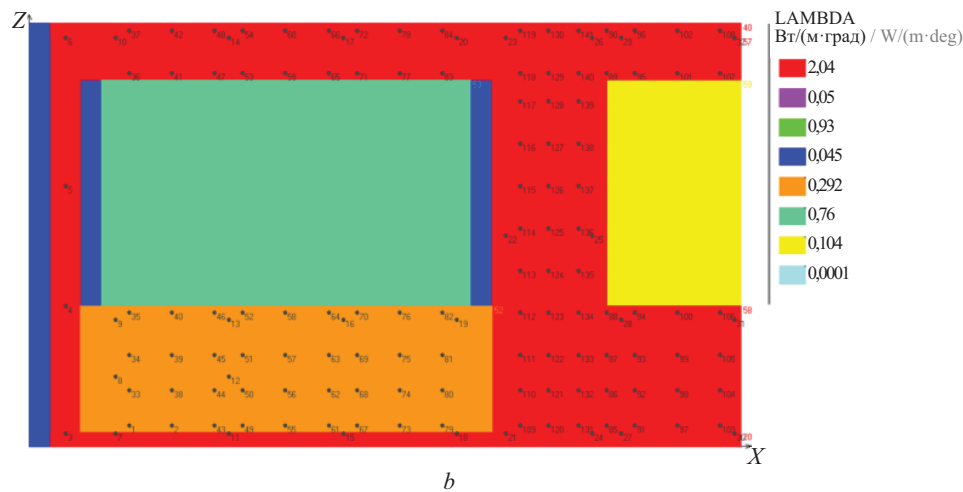


Рис. 3. Расчетная схема. Вид на наружную грань продольной наружной стены: *a* — по утеплителю; *b* — под утеплителем

Fig. 3. Calculation model. Outer surface of the longitudinal external wall: *a* — over the insulation layer; *b* — beneath the insulation layer

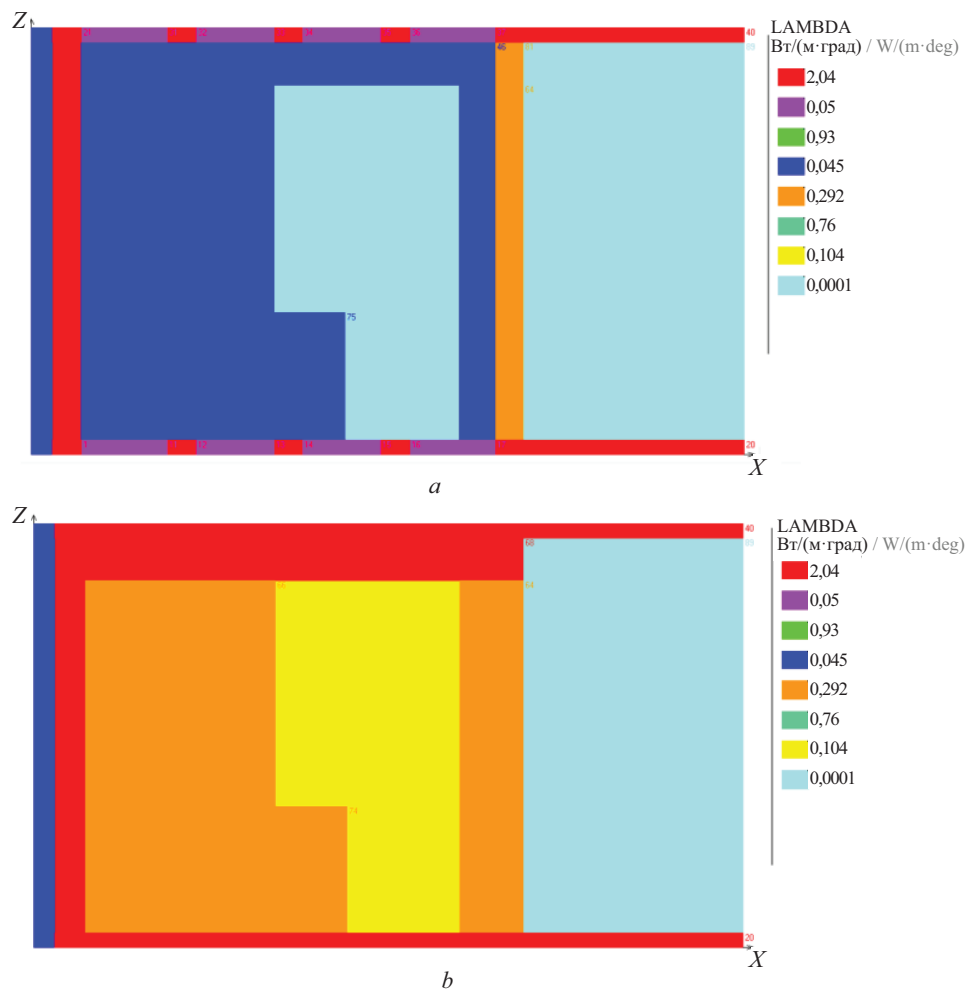


Рис. 4. Расчетная схема. Вид на наружную грань продольной стены лоджии: *a* — по утеплителю; *b* — под утеплителем

Fig. 4. Calculation model. External face of the balcony's longitudinal wall: *a* — over the insulation layer; *b* — beneath the insulation layer

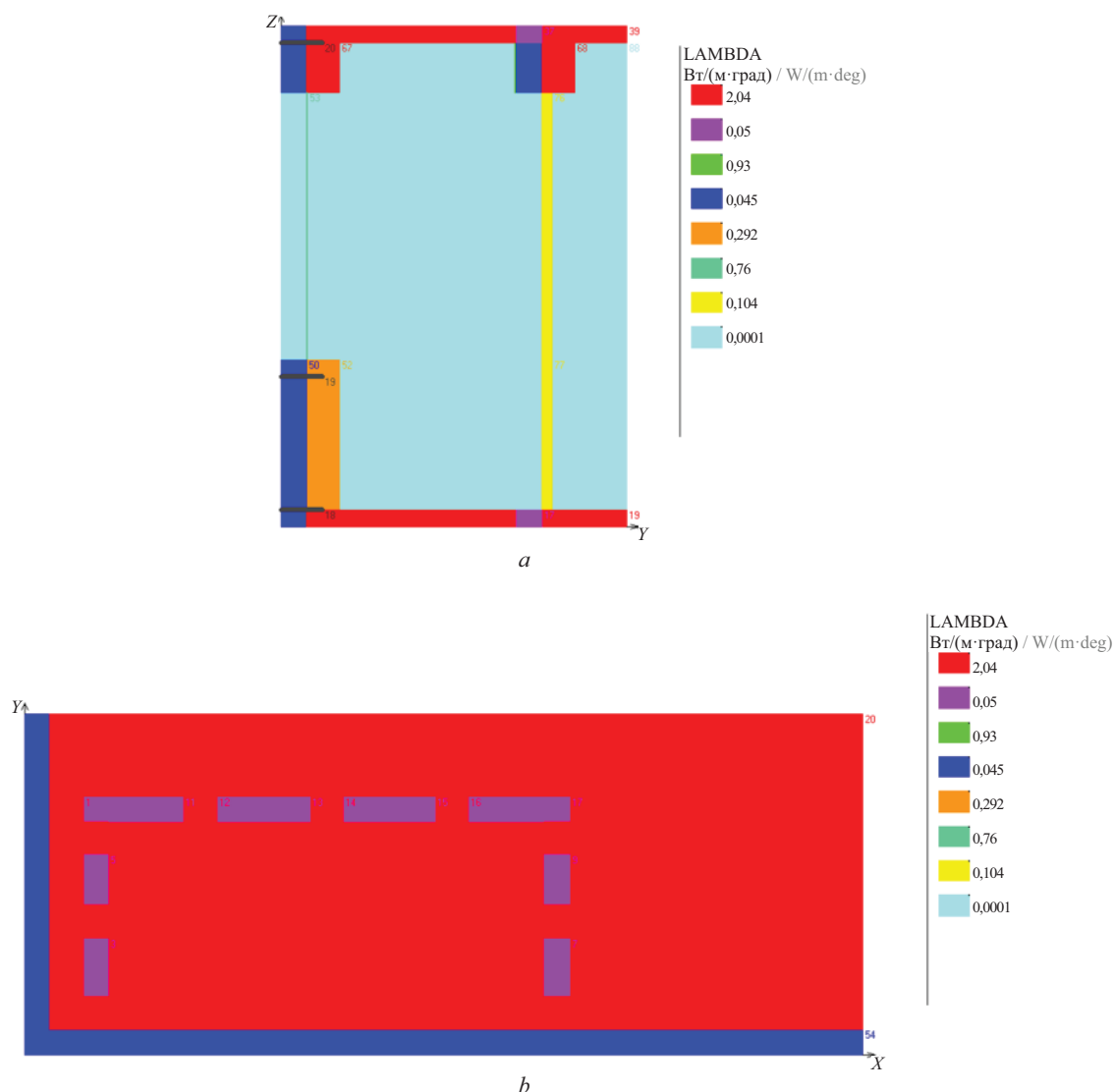


Рис. 5. Расчетная схема: *a* — поперечный разрез по балконной двери; *b* — горизонтальное сечение в пределах толщины плиты перекрытия

Fig. 5. Calculation model: *a* — cross-section through the balcony door; *b* — horizontal section within the thickness of the floor slab

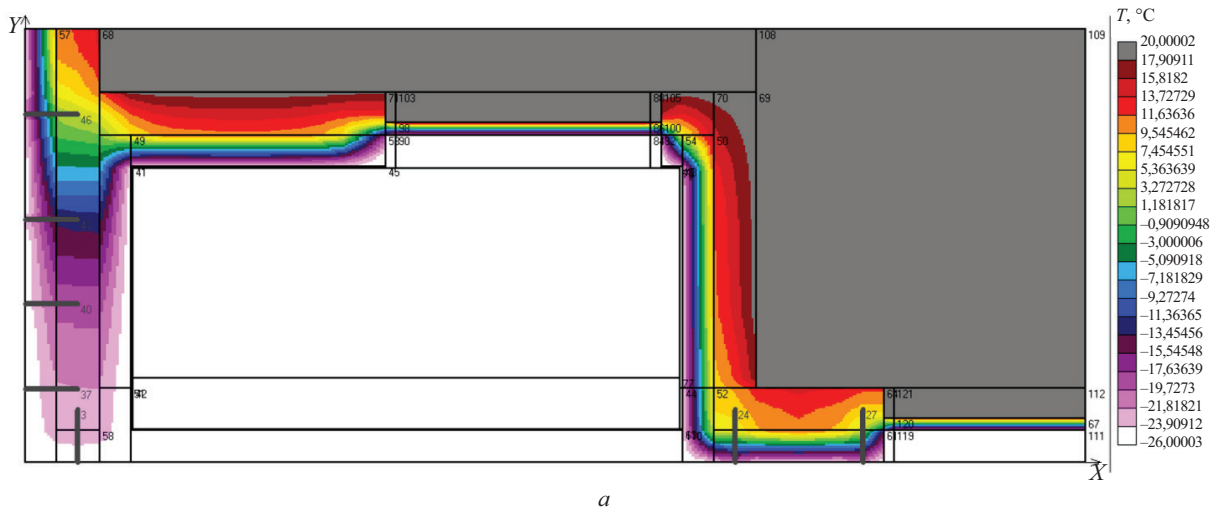
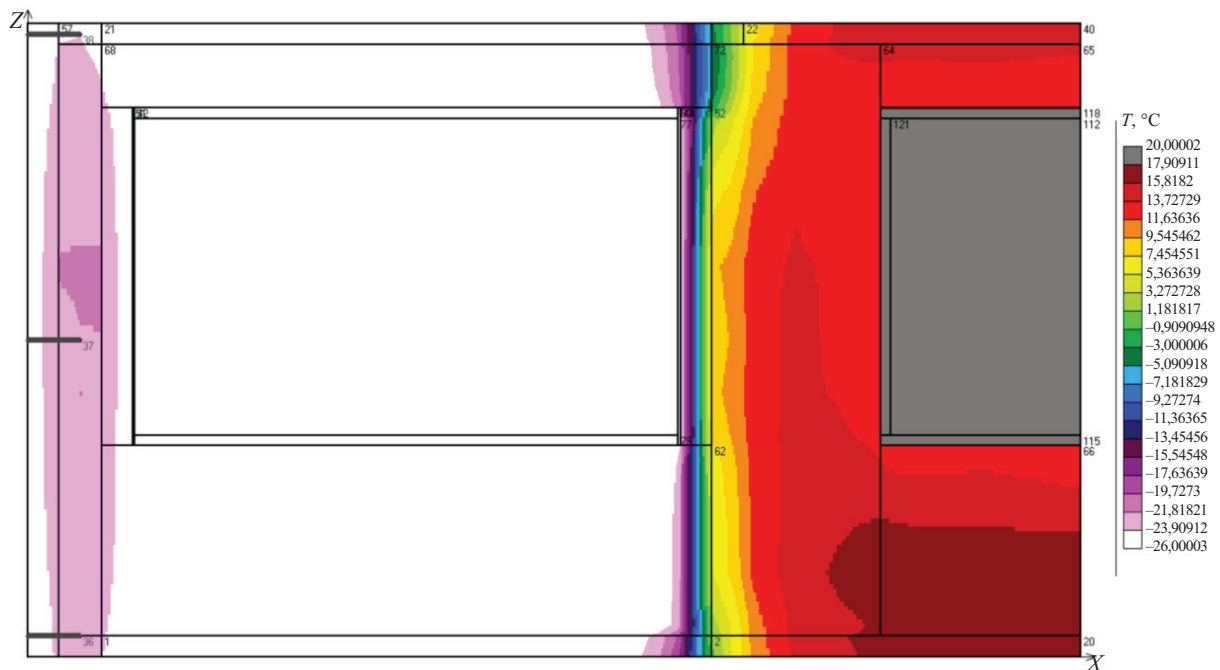
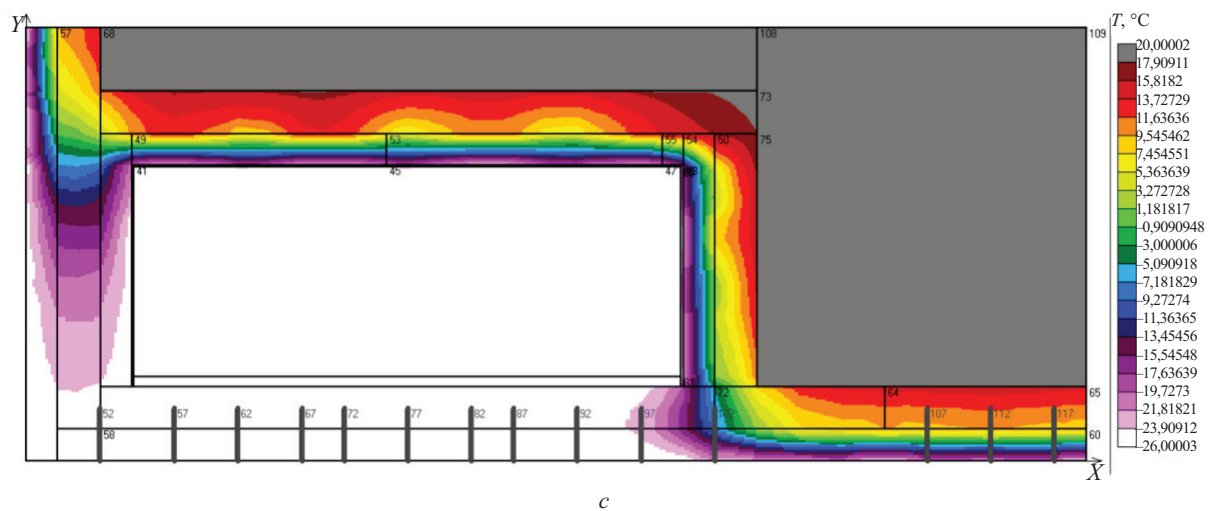
реализовано численное решение дифференциального уравнения трехмерной стационарной теплопроводности.

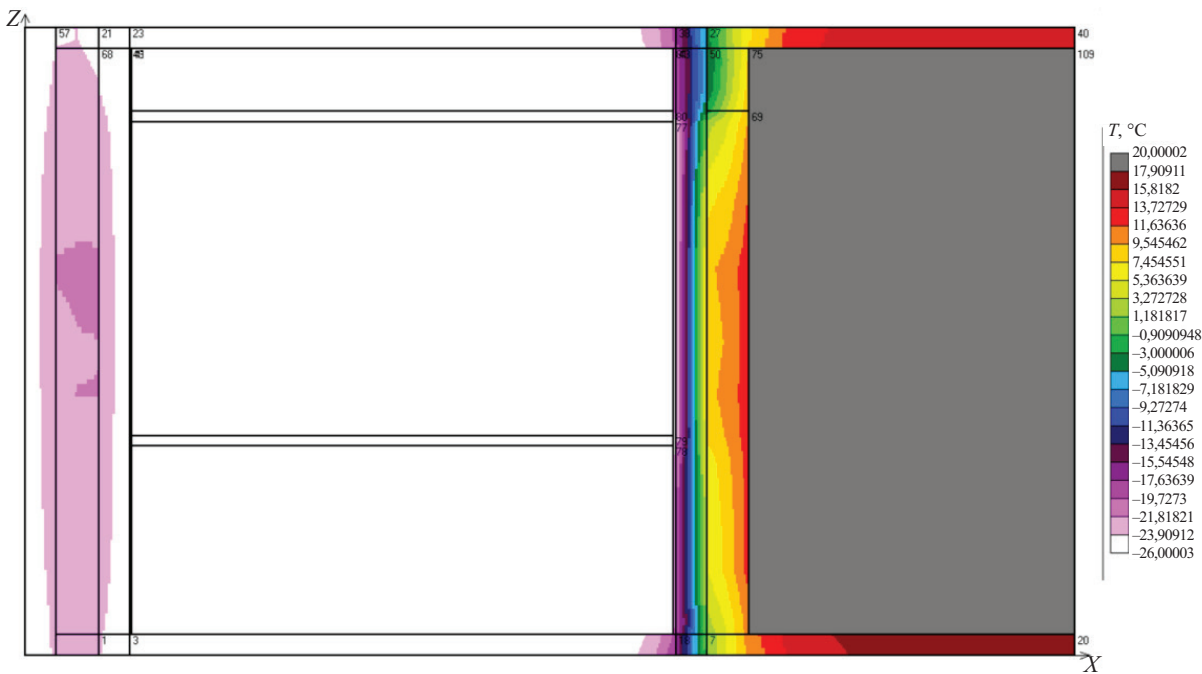
Расчетная модель включает в себя лоджию и прилегающие ограждающие конструкции здания в пределах одного этажа (рис. 2).

Граничные условия заданы в виде теплового потока, равного 0 на плоскостях, по которым рассматриваемый в составе расчетной модели участок здания отделен от остальной части: в продольном направлении — по оси симметрии окна в наружной стене, в поперечном направлении — на расстоянии 300 мм от внутренней поверхности газобетонных блоков, отделяющих лоджию от внутреннего помещения, и по высоте — от середины толщины плиты перекрытия верхнего этажа до середины толщины плиты перекрытия нижнего этажа.

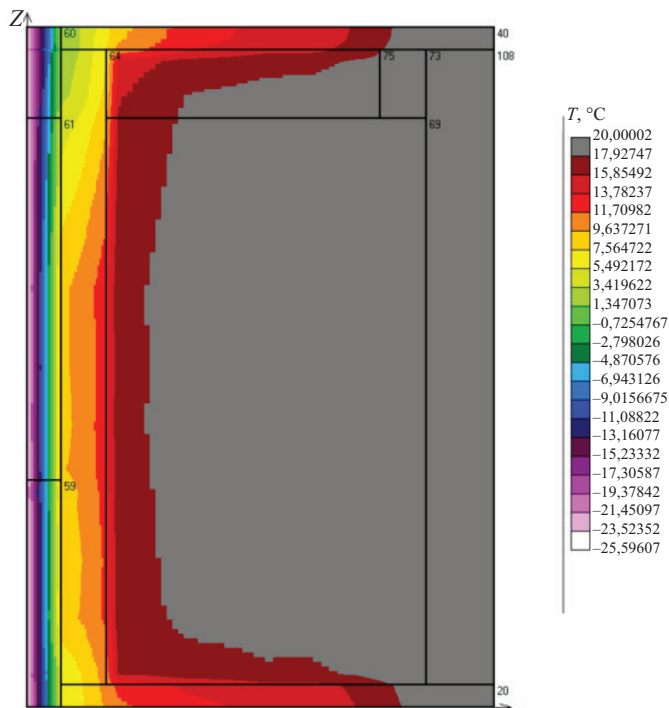
Расчет выполнен в соответствии с нормативными требованиями тепловой защиты зданий. Расчетная температура внутреннего воздуха принята +20 °C (по минимальным значениям оптимальной температуры для жилых зданий (ГОСТ 30494)). Расчетная температура наружного воздуха принята равной температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, что для Москвы составляет –26 °C (табл. 3.1 СП 131.13330³). Температура воздуха в пределах лоджии принята равной температуре наружного воздуха. В табл. 1 приведены расчетные теплотехнические характеристики материалов конструкций с их цветовой маркировкой, заданные в расчетной модели.

³ СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. М. : Минстрой России, 2025.

 a 
$$b$$
 $\mathcal{C}$



d



e

Рис. 6. Распределение температур: в наружных стенах на высоте 1,5 м от пола (a); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (b); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (c); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (d); на внутренней поверхности стены лоджии (e)

Fig. 6. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (a); of the external wall at the balcony wall junction (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (e)

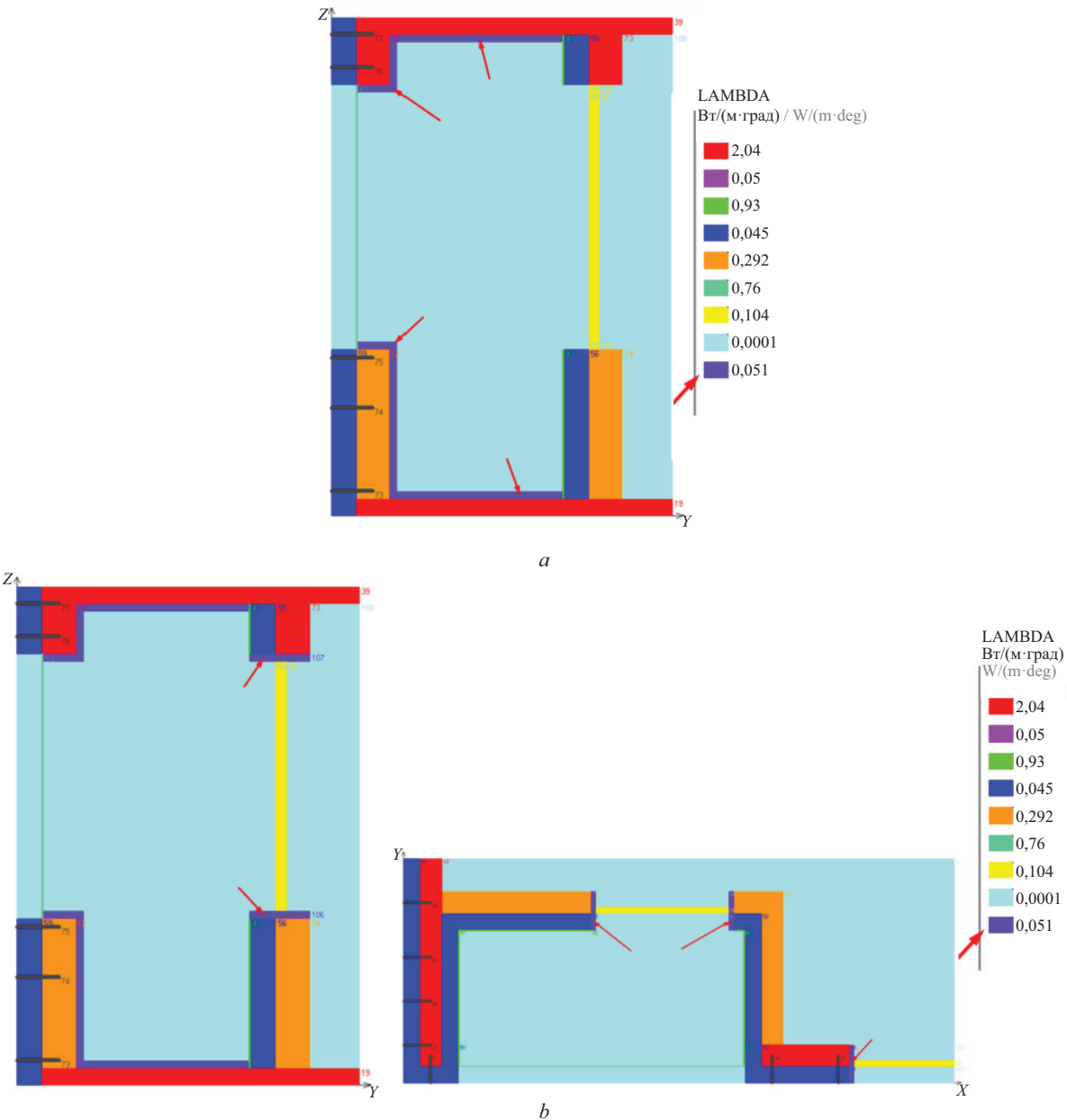
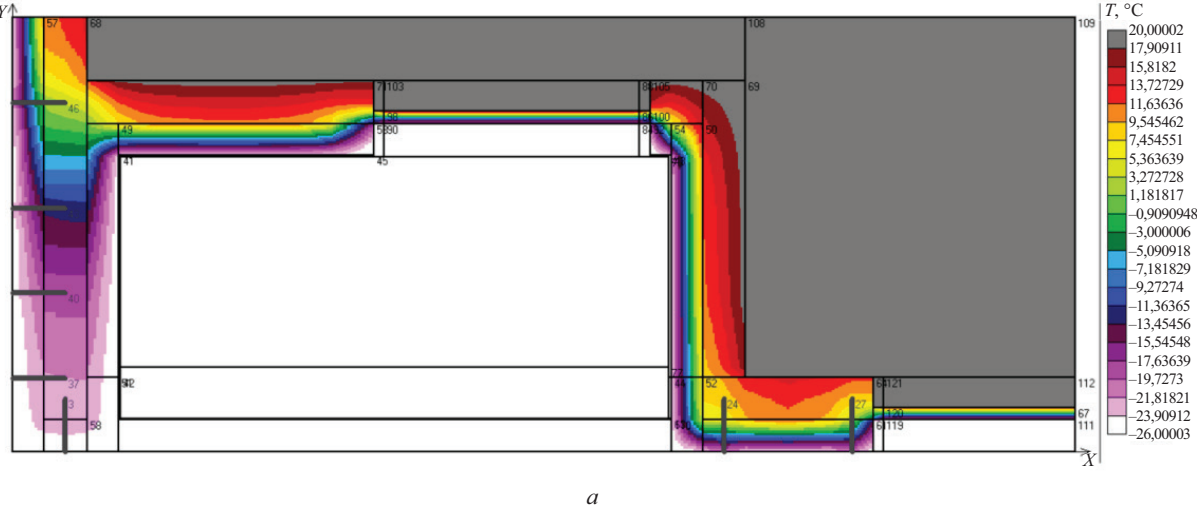
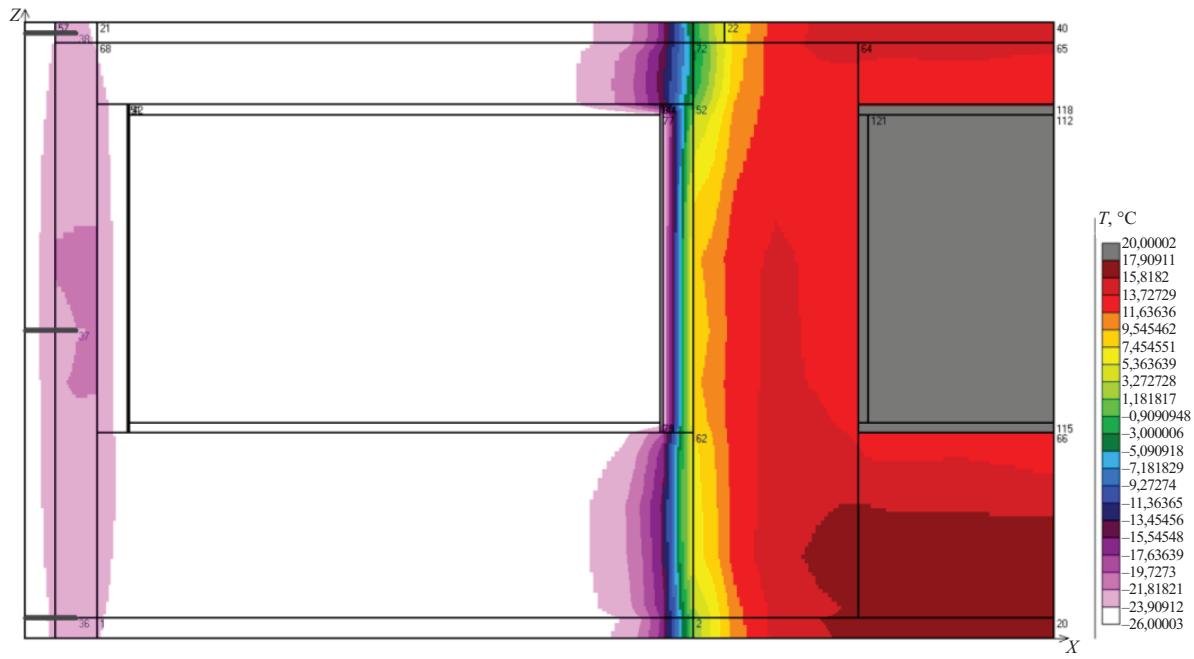


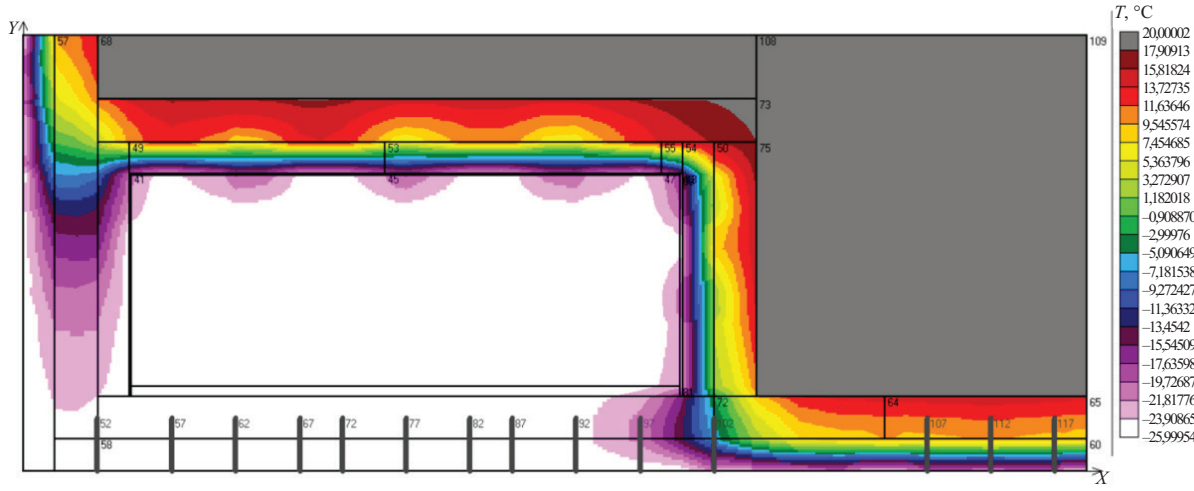
Рис. 7. Расчетные схемы конструкции с дополнительным утеплением: *a* — вариант 1: утепление пола, потолка и перемычки над окном в лоджии; *b* — вариант 2: дополнительное утепление откосов окон и балконной двери

Fig. 7. Calculation models of the structure with added insulation: *a* — option 1: insulation applied to the balcony floor, ceiling, and lintel; *b* — option 2: additional insulation of window and balcony door jambs

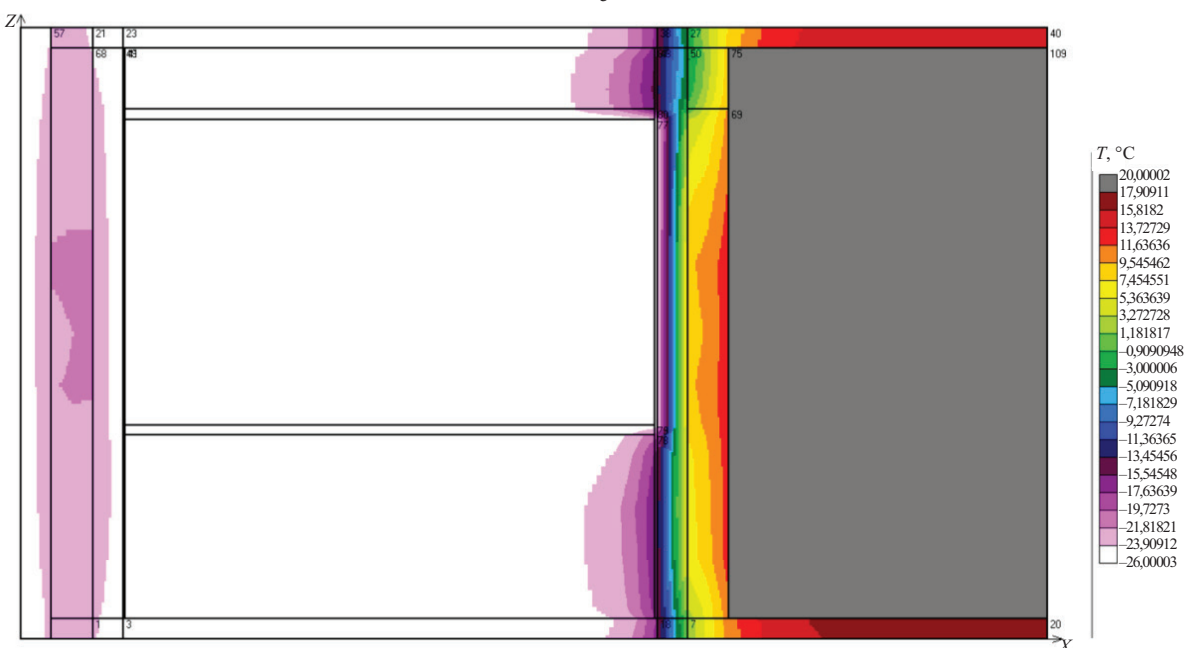




b



c



d

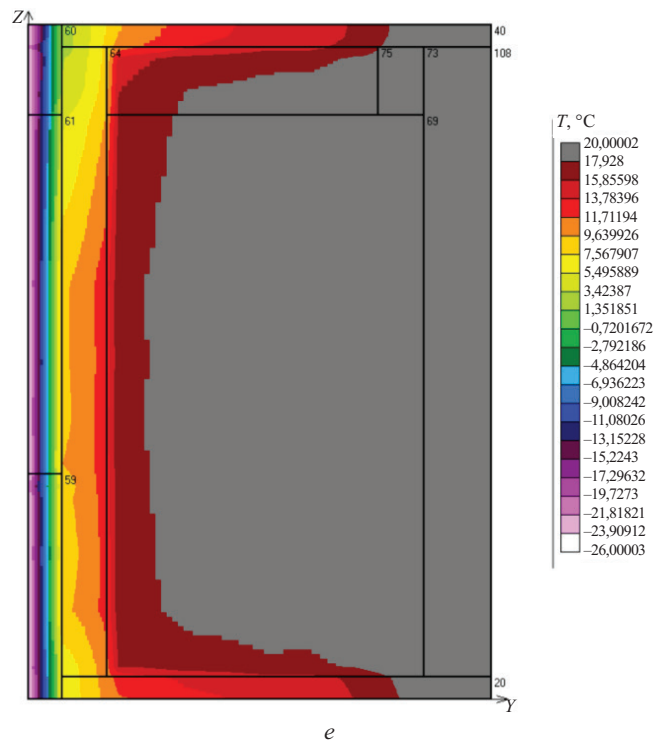


Рис. 8. Распределение температур в конструкциях, утепленных по первому варианту: в наружной стене на высоте 1,5 м от пола (a); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (b); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (c); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (d); на внутренней поверхности стены лоджии (e)

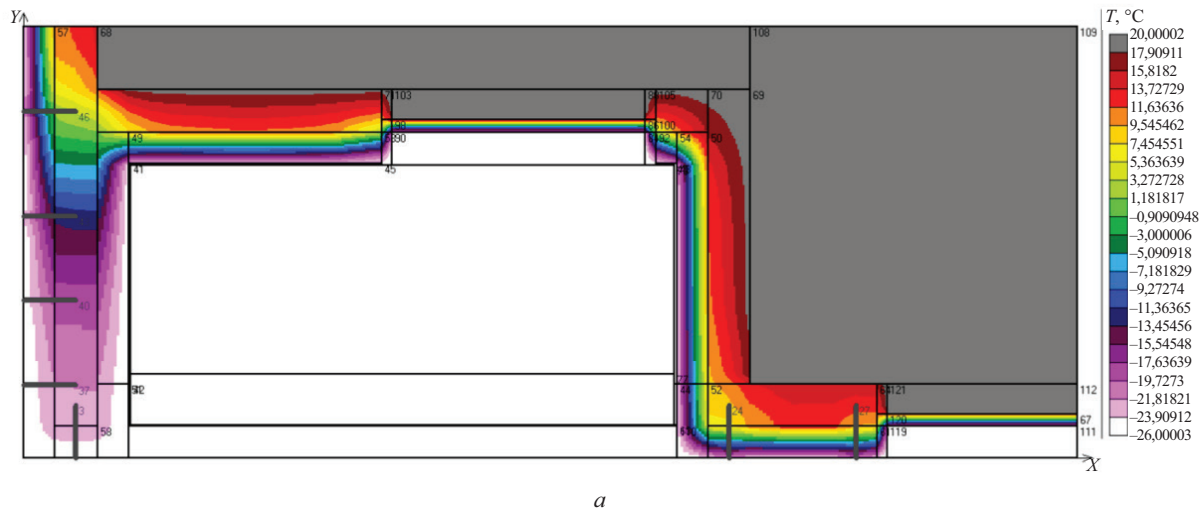
Fig. 8. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (insulation option 1) (a); temperature distribution pattern on the interior surface of the external wall at the balcony wall junction (insulation option 1) (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (insulation option 1) (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (insulation option 1) (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (insulation option 1) (e)

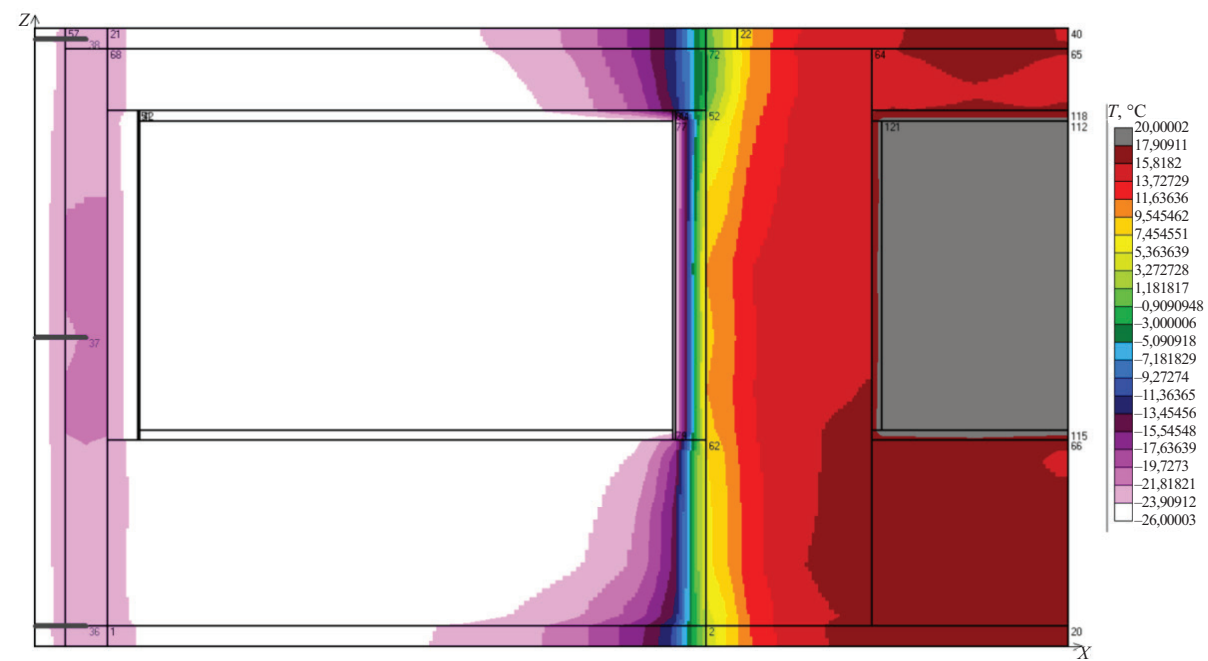
Учитывался теплообмен на поверхностях, граничащих с воздухом. Для поверхностей, граничащих с внутренним воздухом, коэффициент теплоотдачи задан $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; для плоскостей, граничащих с наружным воздухом, — $\alpha_{н} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Крепежные детали в навесной фасадной системе (несущие кронштейны), а также дюбели для кре-

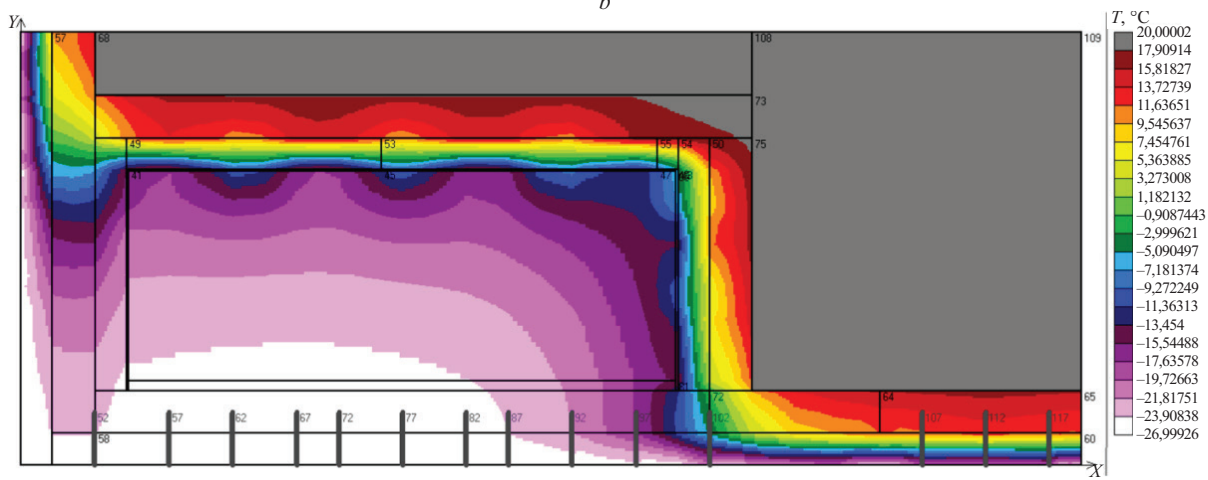
пления плит утеплителя, являющиеся точечными теплопроводными включениями, в расчетной схеме задавались как стержневые элементы с площадями, равными 222 и 78,5 мм² соответственно.

На рис. 3–5 изображены характерные виды и сечения конструкций, смоделированных в расчетной схеме исследуемого фрагмента фасада здания, на ко-

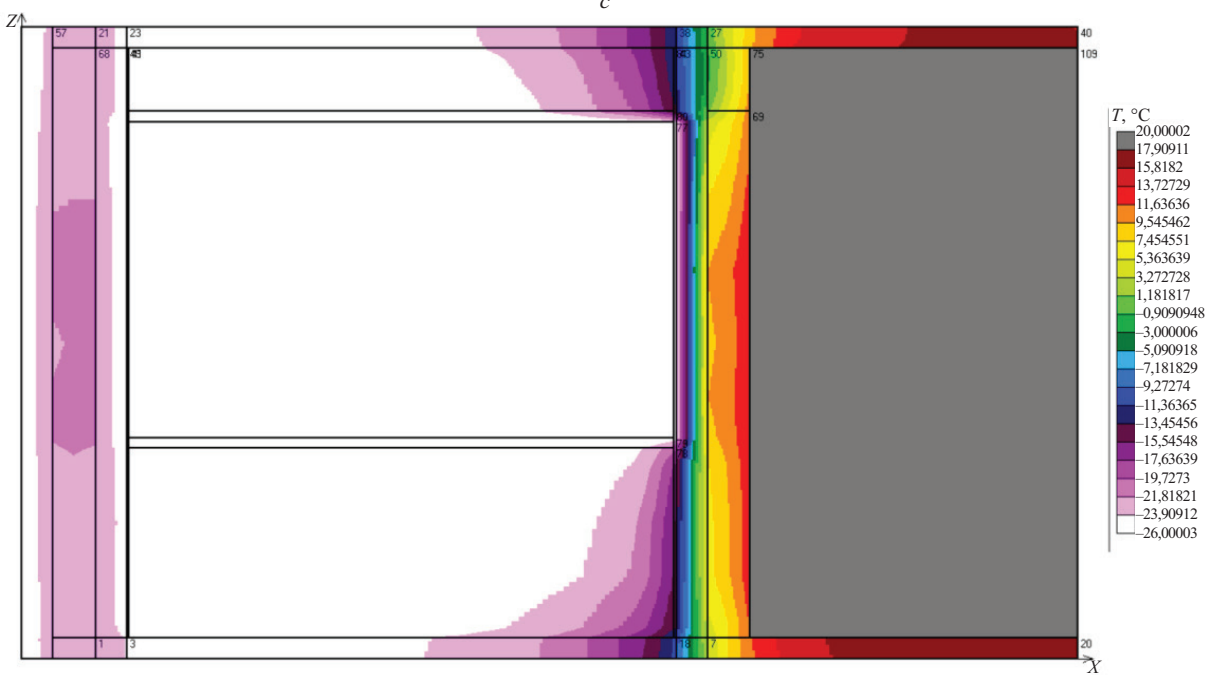




b



c



d

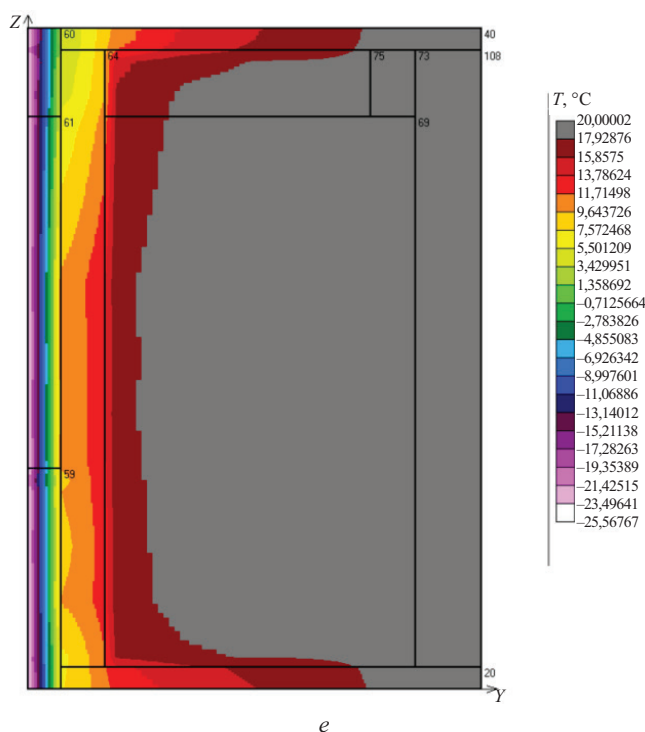


Рис. 9. Распределение температур в конструкциях, утепленных по второму варианту: в наружной стене на высоте 1,5 м от пола (а); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (b); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (с); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (d); на внутренней поверхности стены лоджии (е)

Fig. 9. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (insulation option 2) (a); temperature distribution pattern on the interior surface of the external wall at the balcony wall junction (insulation option 2) (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (insulation option 2) (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (insulation option 2) (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (insulation option 2) (e)

торых разным цветом показаны конструктивные элементы, обладающие различными коэффициентами теплопроводности (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования тепловой эффективности вертикальных ограждающих конструкций монолитного жилого здания с лоджиями проводились с целью проверки расчетного сопротивления теплопередаче наружной стены строящегося в Москве объекта и выявления наличия «мостиков холода» в ее конструктивном решении.

По результатам численного расчета с использованием программного комплекса (ПК) THERL получены трехмерные картины распределения температур в исследуемой конструкции, анализ которых наглядно продемонстрировал места с пониженными температурами, свидетельствующими о наличии в этих зонах «мостиков холода». Такими местами являются: выступающий (наружный) угол здания (в месте устройства лоджии), откосы оконных проемов, а также и, главным образом, область контакта монолитной железобетонной плиты перекрытия с балкой, выпол-

няющей функцию перемычки над витражом в лоджии (рис. 6).

Необходимо отметить, что температура на внутренней поверхности стены в этих местах опускается до +9,5 °C, а в месте сопряжения железобетонной плиты с перемычкой до +7,5 °C (рис. 6, e), что ниже температуры точки росы для жилых зданий, равной +10,7 °C. Такая температура свидетельствует о конденсации водяного пара на внутренней поверхности стены и возможном ее намокании, которое может привести к возникновению плесени, грибка и ухудшению эксплуатационной надежности ограждающей конструкции.

Для исключения выявленных «мостиков холода» в исследуемом конструктивном решении наружного ограждения здания были рассмотрены два варианта утепления конструкций. Первый вариант включал утепление железобетонных конструкций пола, потолка и перемычки над окном в лоджии (рис. 7, a), а второй состоял в дополнительном утеплении откосов окон и балконной двери (рис. 7, b).

Картины распределения температур в конструкциях, утепленных по первому варианту, представлены на рис. 8; по второму варианту — на рис. 9.

Табл. 2. Результаты теплотехнического расчета с использованием ПК TEPL

Table 2. Results of the thermal analysis performed using TEPL software

Показатели Indicators	Неутепленные конструкции Non-insulated structures	Утепленные конструкции Insulated structures	
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Расчетная площадь поверхностей ограждения A_R , м ² Estimated surface area of the fencing A_R , m ²	13,38	13,38	14,01
Общий поток тепла через поверхности Q , Вт Total heat flux through surfaces Q , W	563,35	560,38	405,29
Поток тепла через расчетные поверхности, Вт Heat flow through the calculated surfaces, W	375,28	372,94	319,92
Поток тепла через откосы, пол и потолок, Вт Heat flow through slopes, floor and ceiling, W	188,07	187,44	85,37
Средняя плотность потока тепла, Вт/м ² Average heat flux density, W/m ²	42,11	41,89	28,93
Приведенное сопротивление теплопередаче R_o , (м ² ·°C)/Вт Reduced thermal resistance R_o , (m ² ·°C)/W	1,0924	1,0982	1,5899

Сравнительный анализ картин распределения температур в конструкциях после их утепления показал, что утепление пола, потолка и переемычки над окном в лоджии (вариант 1) позволило повысить температуру на внутренней поверхности наружной стены до +10 °С, а дополнительное утепление откосов окон и балконной двери (вариант 2) — до +12 °С и тем самым исключить возможное образование конденсата на ее поверхности.

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче исследуемых конструкций произведен с использованием ПК TEPL на основе величин потока тепла, определенных в результате решения трехмерной задачи стационарной теплопроводности.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определялось по формуле:

$$R_o = \frac{\Delta t \cdot A_R}{Q},$$

где Δt — температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности ограждения, °С; A_R — расчетная площадь ограждающей конструкции, м²; Q — суммарные потери тепла, происходящие через поверхности ограждающей конструкции, а также примыкающие к ней конструкций (откосы, поверхности плит перекрытий, балок, и т.д.), Вт.

В данной задаче анализировалась величина приведенного сопротивления теплопередаче непосредственно наружного стенового ограждения (без окон). Учитывались тепловые потери Q через стены, откосы оконных проемов и балконной двери, пол и потолок. При этом в расчетную площадь ограждения A_R включались только площади проекций стен на вертикальную плоскость.

Результаты теплотехнического расчета рассматриваемого участка конструкций приведены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, можно отметить высокую эффективность утепления откосов окон-

ных и дверных проемов: поток тепла через ограждающие конструкции снизился на 28 %, благодаря чему приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен увеличилось на 45 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численный анализ тепловой эффективности исследуемых конструкций ограждения показал, что значительные потери тепла происходят через откосы окон и балконной двери. Так, общий поток тепла через конструкцию с теплоизоляцией на откосах снизился на 28 % по сравнению с потоком тепла через неутепленную конструкцию, соответствующую проектному решению рассматриваемого жилого здания. При этом утепление пола, потолка и переемычки над окном в лоджии позволило сократить общий поток тепла через ограждение всего на 1 %.

Величина приведенного сопротивления, определенная на основе данных трехмерного расчета температурных полей, вычисленная с помощью ПК TEPL, получена с учетом всех потерь тепла на поверхностях теплообмена исследуемой конструкции ограждения без утепления и составила 1,0924 (м²·°C)/Вт, после утепления откосов — 1,5899 (м²·°C)/Вт. Однако нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, определяемого по формуле (5.1) СП 50.13330, для данного района строительства равно 1,88 (м²·°C)/Вт, превышает расчетное значение сопротивления, что недопустимо. Это говорит о том, что теплозащитные свойства наружных ограждающих конструкций здания недостаточны.

Следует отметить, что величина приведенного сопротивления теплопередаче неутепленной конструкции, полученная в результате расчета по нормативной методике, составила 2,48 (м²·°C)/Вт, что в 2 раза превышает сопротивление теплопередаче, определенное на основе расчета трехмерных температурных полей. Такая разница в результатах объясня-

ется тем, что в расчете по нормативной методике не учитываются потери тепла через окна, их откосы, примыкающие к стенам конструкции перегородок и перекрытий. Как установлено в исследовании [4], в стенах с окнами половина всех потерь тепла происходит через окна, половина через глухую часть стены, при этом через откосы окон теряется до четверти суммарных потерь тепла.

Результаты численной оценки тепловой эффективности конструкции наружной стены монолитного здания с лоджиями на примере строящегося в Москве объекта позволяют заключить:

1. Конструктивное решение наружного вертикального ограждения здания не обеспечивает нормируемой теплозащиты здания, так как $R_{0}^{норм} > R_{0}^{пр}$ и требует утепления отдельных конструктивных элементов.

2. Теплотехнический расчет ограждающих конструкций в соответствии с методиками, изложенными в нормативной литературе, приводит к недопустимым погрешностям в определении приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, что отмечено также в работах [17, 18]. Это может нега-

тивно отразиться при проектировании на выборе конструктивного решения наружных ограждающих конструкций здания, не обеспечивающего требуемую эксплуатационную надежность.

3. Оценку тепловой эффективности наружных вертикальных ограждающих конструкций необходимо производить на основе расчета трехмерного температурного поля, позволяющего не только точно определить величину приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, но и выявить имеющиеся в конструкции «мостики холода» для их устранения в конструктивном решении.

4. Для корректной оценки тепловой эффективности многослойных ограждающих конструкций, в том числе наружных стен с окнами, может быть использован ВК ТЕПЛ, с использованием которого выполнено настоящее исследование. Верификация комплекса подтверждена многочисленными исследованиями тепловой эффективности различных конструкций ограждений, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными данными [4] и результатами численных расчетов с применением других вычислительных комплексов [19, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. NY, 1980. 197 p.
2. Туснина О.А., Туснин А.Р. Программный комплекс для теплотехнического расчета строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 4. С. 51–54. EDN SAZOLL.
3. Туснина О.А. Теплотехнический расчет конструкций численными методами // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 91–99. EDN ROWKFB.
4. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103439.
5. Abass F., Ismail L.H., Wahab I.A., Elgadi A.A. Development of a Model for OTTV and RTTV based on BIMVPL to Optimize the Envelope Thermal Performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 713. Issue 1. P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899x/713/1/012009
6. Najjar M.K., Rosa A.C., Hammad A.W.A., Vazquez E., Evangelista A.C.J., Tam V.W.Y. A regression-based framework to examine thermal loads of buildings // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 292. P. 126021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126021
7. Dino I.G., Sari A.E., Iseri O.K., Akin S., Kal-faoglu E., Erdogan B. et al. Image-based construction of building energy models using computer vision // Automation in Construction. 2020. Vol. 116. P. 103231. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103231
8. Schukina T., Kurasov I., Drapaliuk D., Popov P. Improving the energy efficiency of buildings based on the use of integrated solar wall panels // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009
9. M'ziane M.C., Grine A., Younsi Z., Touhami M.S.K. Modelling and Numerical Simulation of a Passive Wall Incorporating a Phase Change Material // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. Vol. 79. Issue 1. Pp. 169–181. DOI: 10.37934/arfmts.79.1.169181
10. Stonkuvienė A., Bliūdžius R., Burlingis A., Ramanauskas J. The impact of connector's thermal and geometrical characteristics on the energy performance of facade systems // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. P. 102085. DOI: 10.1016/j.job.2020.102085
11. Zhang F., Ju Y., Santibanez Gonzalez E.D.R., Wang A., Dong P., Giannakis M. A new framework to select energy-efficient retrofit schemes of external walls: A case study // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 289. P. 125718. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125718
12. Протасевич А.М., Лешкевич В.В. Расчет температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов // Энергоэффективность. 2013. № 10. С. 16–20.
13. Švajlenka J., Kozlovská M., Vranay F., Pošiváková T., Jámbořová M. Comparison of laboratory and computational models of selected thermal-technical

properties of constructions systems based on wood // *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 12. P. 3127. DOI: 10.3390/en13123127

14. Ghedhab M.E., El Abbassi I., Absi R., Mélinge Y. Numerical study of the effect of DSF walls geometrical shape on heat transfer // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 170. P. 01005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202017001005

15. Al-Sanea S.A., Zedan M.F. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions // *Applied Energy*. 2012. Vol. 98. Pp. 584–593. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.038

16. Shaik S., Nagaraju S., Rizvan S.M., Gorantla K.K. Optimizing Vertical Air Gap Location Inside the Wall for Energy Efficient Building Enclosure Design Based on Unsteady Heat Transfer Characteristics // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 1003–1009. DOI: 10.1007/978-981-15-0035-0_80

17. Козлов В.В. Вопросы точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 3 (77). С. 62–74. EDN UTKMBM.

18. Федоров С.В., Терехова И.А. Оценка корректности теплотехнических расчетов ограждающих конструкций методом конечных элементов // *Прикладная математика и фундаментальная информатика*. 2017. Т. 4. № 1. С. 31–42. EDN YZKCZN.

19. Туснина В.М., Файзов Д.Ш. К вопросу теплотехнического расчета неоднородных ограждающих конструкций зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 4. С. 19–24. EDN YKPKDKR.

20. Соловьев А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 2 (46). С. 24–35. DOI: 10.5862/MCE.46.4. EDN RZTSEL.

Поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Александровна Туснина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; TushninaOA@mgsu.ru;

Валентина Матвеевна Туснина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7716-5978, РИНЦ ID: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; TushninaVM@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. NY, 1980; 197.

2. Tushnina O.A., Tushnin A.R. A computing program for the thermal analysis of building structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 4:51-54. EDN SAZOLL. (rus.).

3. Tushnina O.A. Thermotechnical analysis of the structures by using numerical methods. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 11:91-99. EDN ROWKFB. (rus.).

4. Tushnina V., Tushnin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103439.

5. Abass F., Ismail L.H., Wahab I.A., Elgadi A.A. Development of a Model for OTTV and RTTV based

on BIMVPL to Optimize the Envelope Thermal Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 713(1):012009. DOI: 10.1088/1757-899x/713/1/012009

6. Najjar M.K., Rosa A.C., Hammad A.W.A., Vazquez E., Evangelista A.C.J., Tam V.W.Y. A regression-based framework to examine thermal loads of buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 292:126021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126021

7. Dino I.G., Sari A.E., Iseri O.K., Akin S., Kalfaoglu E., Erdogan B. et al. Image-based construction of building energy models using computer vision. *Automation in Construction*. 2020; 116:103231. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103231

8. Schukina T., Kurasov I., Drapaliuk D., Popov P. Improving the energy efficiency of buildings based

on the use of integrated solar wall panels. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009

9. M'ziane M.C., Grine A., Younsi Z., Touhami M.S.K. Modelling and Numerical Simulation of a Passive Wall Incorporating a Phase Change Material. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021; 79(1):169-181. DOI: 10.37934arfmts.79.1.169181

10. Stonkuvienė A., Bliūdžius R., Burlingis A., Ramanauskas J. The impact of connector's thermal and geometrical characteristics on the energy performance of facade systems. *Journal of Building Engineering*. 2021; 35:102085. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.102085

11. Zhang F., Ju Y., Santibanez Gonzalez E.D.R., Wang A., Dong P., Giannakis M. A new framework to select energy-efficient retrofit schemes of external walls: A case study. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 289:125718. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125718

12. Protasevich A.M., Leshkevich V.V. Calculation of the temperature field of multilayer enclosing structures with heat-conducting inclusions using the finite element method. *Energy Efficiency*. 2013; 10:16-20. (rus.).

13. Švajlenka J., Kozlovská M., Vranay F., Pošiváková T., Jámbořová M. Comparison of laboratory and computational models of selected thermal-technical properties of constructions systems based on wood. *Energies*. 2020; 13(12):3127. DOI: 10.3390/en13123127

14. Ghedhab M.E., El Abbassi I., Absi R., Mélinge Y. Numerical study of the effect of DSF walls geometrical shape on heat transfer. *E3S Web of Conferences*. 2020; 170:01005. DOI: 10.1051/e3sconf/202017001005

15. Al-Sanea S.A., Zedan M.F. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. *Applied Energy*. 2012; 98:584-593. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.038

16. Shaik S., Nagaraju S., Rizvan S.M., Gorantla K.K. Optimizing Vertical Air Gap Location Inside the Wall for Energy Efficient Building Enclosure Design Based on Unsteady Heat Transfer Characteristics. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1003-1009. DOI: 10.1007/978-981-15-0035-0_80

17. Kozlov V.V. Accuracy of calculation of the resistant resistance of heat transfer and temperature fields. *Building and Reconstruction*. 2018; 3(77):62-74. EDN UTKMBM. (rus.).

18. Fedorov S.V., Terekhova I.A. Evaluation of the correctness of thermal calculations of enclosing structures using the finite element method. *Applied Mathematics and Fundamental Informatics*. 2017; 4(1):31-42. EDN YZKCZN. (rus.).

19. Tushina V.M., Fayzov D.Sh. To the issue of thermo-technical calculation of non-uniform enclosing structures of buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 4:19-24. EDN YKPKDKR. (rus.).

20. Solovyev A.K., Tushina O.A. A comparative thermal analysis of systems of the upper daylight (clerestory and daylight guidance system). *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 2(46):24-35. DOI: 10.5862/MCE.46.4. EDN RZTSEL. (rus.).

Received December 2, 2025.

Adopted in revised form on December 5, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

B I O N O T E S: **Olga A. Tushina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor 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; SPIN-code: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; TushinaOA@mgsu.ru;

Valentina M. Tushina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor docent, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7716-5978, ID RSCI: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; TushinaVM@mgsu.ru.

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

Механические характеристики и водопоглощение сжатых грунтовых кирпичей, стабилизированных малыми дозами извести и цемента

Насратулла Абдул Гафур Насрат, Мохаммед Ибрагим Абу Махади,
Махмуд Абдельсалам Ареф Обейд

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сжатые стабилизированные грунтовые кирпичи (ССГК) представляют собой устойчивую альтернативу традиционному обожженному кирпичу, обеспечивая значительные экологические преимущества, такие как снижение энергопотребления и уменьшение выбросов углерода. ССГК изготавливаются путем смешивания грунта, песка, воды и стабилизирующей добавки, как правило, портландцемента, извести, золы-уноса, битума или их комбинации с последующим механическим уплотнением смеси в формах.

Материалы и методы. Изучены механические свойства (прочность на сжатие и прочность при изгибе) и водопоглощение ССГК, стабилизированных в малых дозировках: 2 % извести + 3 % цемента, 3 % извести + 4 % цемента, 4 % извести + 6 % цемента, 5 % цемента, 0 % стабилизатора (нестабилизированный образец). Экспериментальная программа включала оценку прочности на сжатие в сухом и увлажненном состоянии, прочности при изгибе, а также капиллярного и общего водопоглощения.

Результаты. Увеличение содержания стабилизатора значительно повышает как прочность на сжатие, так и прочность при изгибе. При этом механические характеристики соответствуют требованиям стандартов для категорий А и В. Однако общее водопоглощение также возрастает с увеличением дозировки стабилизатора. Несмотря на это, зафиксированные значения водопоглощения остаются ниже максимальных пределов, установленных соответствующими стандартами.

Выводы. В целом результаты исследования демонстрируют, что применение небольших дозировок стабилизаторов позволяет ССГК обладать достаточным потенциалом в качестве устойчивого, эффективного и пригодного для практического применения строительного материала. Использование местных сырьевых ресурсов способствует существенному снижению стоимости строительства и минимизации негативного воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными обожженными кирпичами и бетонными блоками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ССГК, влияние стабилизаторов, тип и количество стабилизаторов, водопоглощение, прочность на сжатие, прочность при изгибе, грунты для ССГК

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность кафедре гражданского строительства инженерного факультета Кабульского политехнического университета за предоставление лабораторного оборудования, необходимого для проведения данного исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Насрат Н.А.Г., Абу Махади М.И., Обейд М.А.А. Механические характеристики и водопоглощение сжатых грунтовых кирпичей, стабилизированных малыми дозами извести и цемента // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 84–94. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.84-94

Автор, ответственный за переписку: Насратулла Абдул Гафур Насрат, nasratullahnasrat609@yahoo.com.

Mechanical performance and water absorption in compressed earth bricks stabilized with small doses of lime and cement

Nasratullah Abdul Ghafoor Nasrat, Mohammed Ibrahim Abu Mahadi,
Mahmoud Abdelsalam Aref Obeid

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Compressed Stabilized Earth Bricks (CSEB) represent a sustainable alternative to conventional burnt clay bricks, offering significant environmental benefits such as reduced energy consumption and a lower carbon footprint. CSEB are manufactured by mixing soil, sand, water, and a stabilizer typically ordinary Portland cement, lime, fly ash, bitumen, or a combination thereof followed by mechanical compaction of the mixture in a mold.

Materials and method. This study investigates the mechanical properties (compressive strength and flexural tensile strength) and water absorption behaviour of CSEB stabilized with low dosages of stabilizers: 2 % lime + 3 % cement, 3 %

lime + 4 % cement, 4 % lime + 6 % cement, 5 % cement, and 0 % stabilizer (unstabilized). The experimental programme includes evaluation of compressive strength in both dry and wet states, flexural tensile strength, capillary water absorption, and total water absorption.

Results. Results indicate that increasing the stabilizer content significantly enhances both compressive and flexural strength, and the mechanical properties were in the A and B CSEB categories of the standards requirements. However, total water absorption also increased with increasing stabilizer dosage. Despite this, the observed absorption values remained below the maximum limits specified in relevant standards.

Conclusions. Overall, the research findings demonstrate that by using the low dosages of stabilizers, CSEB can have appropriate potential as a sustainable, beneficial, and applicable building material, where the use of locally sourced materials can consequentially reduce construction costs and minimize environmental impact compared to conventional fired clay bricks and concrete blocks.

KEYWORDS: CSEB, effect of stabilizers, types and amounts of stabilizers, water absorption, compressive strength, flexural strength, soils for CSEB

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kabul Polytechnic University for providing the laboratory equipment necessary for this study.

FOR CITATION: Nasrat N.A.G., Abu Mahadi M.I., Obeid M.A.A. Mechanical performance and water absorption in compressed earth bricks stabilized with small doses of lime and cement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):84-94. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.84-94 (rus.).

Corresponding author: Nasratullah Abdul Ghafoor Nasrat, nasratullahnasrat609@yahoo.com.

ВВЕДЕНИЕ

Грунт — самый доступный, дешевый и распространенный строительный материал. Однако добавление вяжущих или армирующих элементов может улучшить его инженерные свойства [1]. Сжатые стабилизированные грунтовые кирпичи (ССГК) обеспечивают значительную теплоемкость зданий, что позволяет использовать их для пассивного солнечного отопления, способствуя поддержанию комфортной внутренней температуры и снижению потребности в искусственном охлаждении и отоплении. Благодаря высокому содержанию глины такие кирпичи естественным образом «дышат», регулируя уровень влажности в помещениях и улучшая качество воздуха. В зданиях, построенных из прессованных стабилизированных грунтовых кирпичей, относительная влажность воздуха обычно колеблется в пределах 40–60 % [2]. Прессованные стабилизированные грунтовые кирпичи обладают теплопроводностью, сопоставимой с традиционными материалами, а также повышенной долговечностью, прочностью и экологичностью. Было показано, что ССГК могут быть столь же долговечными, как и обычные обожженные глиняные кирпичи, а конструкции из композитного земляного кирпича практически полностью огнестойки [3]. P.J. Walker [4] отметил, что большинство типов грунтов в естественном состоянии обладают недостаточной устойчивостью, прочностью и долговечностью. Следовательно, для производства кирпичей из стабилизированной прессованной земли необходимо улучшать свойства грунта с помощью механической и химической стабилизации. Химическая стабилизация заключается во введении стабилизаторов в грунт, механическая — в уплотнении смеси в формах с целью уменьшения пористости. Наиболее часто применяемыми стабилизаторами являются известь, цемент, битум, асфальт, гидроизоляции-

онные материалы, химические вяжущие, а также промышленные и природные побочные продукты.

Сжатые стабилизированные грунтовые кирпичи по сравнению с обожженным кирпичом требуют значительно меньше энергии при производстве и выделяют на 80 % меньше CO₂ в атмосферу. Кроме того, себестоимость ССГК ниже, чем у традиционного обожженного глиняного кирпича [5]. При производстве блоков из прессованной стабилизированной земли наиболее широко используемыми стабилизаторами служат цемент и известь [6]. Известь применяется в качестве стабилизатора грунта с древних времен [7] и до сих пор широко используется при изготовлении ССГК [8]. Несмотря на то, что цемент — наиболее распространенный стабилизатор для кирпичей из прессованной земли, его производство требует больше энергии и сопровождается более высокими выбросами CO₂ по сравнению с известью [9]. Кирпичи из прессованной стабилизированной земли демонстрируют отличную, хорошую или умеренную огнестойкость в зависимости от категории, установленной в соответствующем стандарте¹.

При выборе подходящих грунта, песка, стабилизирующих агентов и воды необходимо проявлять особую тщательность — это имеет решающее значение для производства высококачественных земляных кирпичей. Поскольку эти компоненты оказывают существенное влияние на качество и долговечность изделий важно обеспечить правильное уплотнение смеси в форме и выдержать достаточное время для затвердевания. Для производства ССГК грунт должен соответствовать определенным требованиям: не содержать органических и вредных примесей и иметь гранулометрический состав, соответствующий

¹ African standard. WD-ARS 1333. Compressed stabilized earth blocks — requirements, production and construction // African organization for standardization. ARS 1333: 2018 (E) ICS 91.100.15. 2. 61 p.

ший стандарту ISO 14688-1. Так как кирпичи становятся прочнее и приобретают более высокую плотность при производстве, рекомендуется использовать крупный песок². Это влияет на прочность кирпичей, устойчивость к усадке и атмосферным воздействиям [10]. Песчаные частицы стабилизируют смесь и уменьшают усадку, ил улучшает пластичность и удобоукладываемость, а глинистые частицы придают смеси сцепление и способность к изгибу [11].

М.М. Rahman и соавт. [12] использовали песчаный грунт, глинистый грунт и их смесь для изготовления кирпичей, применяя в качестве стабилизаторов известь, цемент и их комбинацию. Авторы отметили, что смесь глинистого и песчаного грунтов с цементной стабилизацией обеспечивает наивысшую прочность на сжатие по сравнению с другими вариантами. С экономической точки зрения комбинированная стабилизация известью и цементом оказалась более эффективной, чем стабилизация только цементом.

В Афганистане около 95 % зданий возводятся с использованием грунта в качестве основного строительного материала. Наиболее распространенными технологиями являются саманные кирпичи и монолитные саманные стены. В большинстве регионов страны грунт содержит значительное количество глины, а песок легко доступен, что делает местные материалы пригодными для производства ССГК. Хотя ССГК могут быть несколько дороже традиционных грунтовых конструкций из-за стоимости стабилизаторов и подготовки смеси, они остаются более экономически выгодными по сравнению с обожженными глиняными кирпичами или бетонными блоками, которые преимущественно используются в городских и сельских районах³.

В данном исследовании изучаются механические свойства (прочность на сжатие и прочность при изгибе) и водопоглощение глиняных блоков, стабилизированных низкими дозами извести и цемента, с целью оценки их прочности, долговечности и потенциала применения в качестве экономически эффективного несущего строительного материала. Учитывая отсутствие ранее проведенных исследований по применению ССГК в строительстве в Афганистане, настоящая работа направлена на восполнение этого пробела в знаниях и поддержку разработки экологически устойчивых и адаптированных к местным условиям строительных материалов.

² Niazi Z., Khanna P., Gupta S., Sirohi R. Stabilized compressed earth block (SCEB) — production and construction guide. New Delhi : Development Alternatives, 2020. 27 p.

³ Guidelines for earthquake resistant design, construction, and retrofitting of buildings in Afghanistan // Ministry of Urban Development and Housing (MUDH), Government of Afghanistan, United Nations Centre for Regional Development (UNCRD), Disaster Management Planning Hyogo Office. 2003. Pp. 9–13.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Глинистый грунт. Для исследования отобран грунт из района Дех-Сабз, широко используемый в провинции Кабул, Афганистан, для производства обожженного кирпича, кирпича-сырца и других каменных работ. Характеристики грунта: pH = 9,5; удельный вес = 3,33; индекс пластичности (IP) = 8,45 %; содержание глины и ила = 90 % были определены до использования. Эти параметры необходимы для производства ССГК и оказывают существенное влияние на выбор типа стабилизатора и конечное качество кирпича. Сжатые стабилизированные грунтовые кирпичи, изготовленные из различных местных грунтов, будут обладать разными механическими свойствами [13, 14].

Согласно исследованиям ряда авторов [15, 16], химический оксидный состав грунта влияет на эксплуатационные характеристики кирпичей из стабилизированной прессованной земли. A. Rolandas и соавт. [15] проанализировали оксидный состав трех типов глинистых грунтов и обнаружили различное содержание диоксида кремния (SiO₂) и оксида алюминия (Al₂O₃). Экспериментальные результаты показали, что грунты с более высоким суммарным содержанием SiO₂ и Al₂O₃ демонстрируют более благоприятные эксплуатационные характеристики. Авторы сделали вывод, что грунты с повышенными концентрациями SiO₂ и Al₂O₃, как правило, обладают лучшими механическими и физическими свойствами.

Песок. Использован песок, полученный методом механического дробления на местном дробильно-сортировочном заводе. Его характеристики, определенные в соответствии со Стандартами AASHTO T-84 и ASTM C-128, следующие: насыпной удельный вес (НУВ) — 2,69, истинный удельный вес — 2,90, водопоглощение — 0,6 %. Эти показатели свидетельствуют о низкой пористости и пригодности песка для строительных целей. Песок был просеян через сито с размером отверстий 4,75 мм, не содержал примесей и органических веществ и имел подходящий гранулометрический состав. Несмотря на то, что в данном районе также доступен природный речной песок, который иногда применяется в строительстве (например, для приготовления растворов и штукатурных работ), его зерна оказались слишком мелкими и часто содержали значительное количество органических примесей. В связи с этим для данного исследования выбран дробленый песок.

Стабилизатор. Для прессованных стабилизированных глиняных кирпичей в качестве стабилизаторов, как правило, применяются цемент, известь или их смесь в зависимости от типа грунта и требований к прочности и долговечности изделий. Н.В. Nagaraj и соавт. [5] предположили, что для обеспечения долгосрочного роста прочности ССГК целесообразно использовать комбинированную стаби-

Состав образцов ССГК с указанием содержания стабилизаторов, %

Show compressed stabilized earth bricks specimens with their stabilizers amounts, %

Образец ССГК Specimen CSEB	Содержание стабилизатора, % Stabilizer content, %				
	2 % известь + + 3 % цемента 2 % lime + 3 % cement	3 % известь + + 4 % цемента 3 % lime + 4 % cement	4 % известь + + 6 % цемента 4 % lime + 6 % cement	5 % цемента 5 % cement	0 %
A	√	–	–	–	–
B	–	√	–	–	–
C	–	–	√	–	–
D	–	–	–	√	–
E	–	–	–	–	√

лизацию известью и цементом, поскольку достичь аналогичного эффекта при применении только цемента или только извести не удастся. При совместном использовании цемент преимущественно стабилизирует песчаную фракцию, а известь глинистую, что в совокупности приводит к повышению прочности и долговечности кирпичей. F.G. Bell [7] исследовал применение извести в концентрациях от 0 до 10 % в качестве стабилизатора и установил, что оптимальный диапазон составляет 4–6 %. J. Norton⁴ показал, что цемент, известь, битум и пуццоланы являются основными материалами, используемыми для стабилизации. Некоторые из них могут применяться в комбинации. При выборе стабилизатора следует убедиться, что он прост в применении, доступен в достаточном количестве для осуществления поставленной задачи (что нередко не выполняется в случае традиционных стабилизаторов) и эффективен даже при низких дозировках. Прежде всего, необходимо убедиться, что его стоимость разумная по сравнению с достигаемыми преимуществами. F.V. Riza и соавт. [17] предположили, что содержание цемента свыше 10 % становится экономически нецелесообразным при производстве сжатых стабилизированных грунтовых кирпичей.

На основании результатов указанных ранее исследований в рамках настоящей работы подготовлено пять составов кирпичных смесей (таблица) с различным содержанием стабилизатора для оценки влияния стабилизации на механические свойства и водопоглощение. В состав смесей вводились стабилизаторы как комбинация обычного портландцемента (марки 53) и гашеной извести, так и цемент, применяемый отдельно, в дозировках, рассчитанных относительно сухого веса грунта. Для сравнения также был подготовлен контрольный образец без стабилизатора (0 %), как указано в таблице.

⁴ Norton J. Building with Earth // Intermediate Technology Development Group Limited Myson House. London, U.K. 1986. Pp. 51–58.

Подготовка кирпича. Состав смеси для исследования определен на основе⁵ предварительных испытаний и включает 28 % глины и ила и 72 % песка и стабилизаторов. Эти пропорции выбраны с учетом наблюдаемого поведения смеси при усадке, а также гранулометрического состава использованных глины и песка (рис. 1, а).

Конкременты грунта размером ≥ 5 мм оказывали негативное влияние на качество кирпича, поэтому перед смешиванием глинистый грунт просеивали через сито с размером отверстий 3,3 мм для удаления комков и посторонних примесей.

Компоненты смеси сначала тщательно перемешивали в сухом состоянии, после чего постепенно добавляли воду до достижения оптимальной влажности (ОВ). Значение ОВ определяли с использованием метода испытания на падение, описанного в документе⁶. Для смешивания и последующей выдержки использовали грунтовые воды. Формование кирпичей осуществляли на ручном прессе CINVA-Ram (рис. 1, б). Размер готовых кирпичей составлял $300 \times 150 \times 100$ мм. В соответствии со стандартом⁶, кирпичи выдерживали во влажной среде в течение 7 суток, а все испытания проводили после 28-дневного периода твердения.

Прочность на сжатие. Прочность на сжатие является наиболее широко используемым показателем для оценки качества кирпича. Такие факторы, как тип и содержание стабилизатора, состав грунта и скорость уплотнения в форме, оказывают значительное влияние на свойства изделий. Испытания на прочность при сжатии проводились на ССГК и нестабилизированных сжатых грунтовых кирпичах в сухом состоянии с целью сравнения эффектив-

⁵ Soil-Cement: Its use in the building // United Nations Publications. New York, USA, 1964. No. 64. IV. 6. Pp. 20–22.

⁶ NZS 4298 (1998). Materials and workmanship for earth buildings [Building Code Compliance Document E2 (AS2)] // Published by Standards New Zealand. Standards Council, Private Bag 2439, Wellington. 6020. Pp. 43–65.



Рис. 1. Исходные материалы для ССГК (а); формовочная машина для производства ССГК (b)
Fig. 1. Show compressed stabilized earth bricks (CSEB) raw materials (a); molding machine CSEB production (b)

ности стабилизатора (рис. 2, а). Однако прочность в сухом состоянии не отражает полностью эксплуатационные условия. В регионах с сезонными наводнениями, обильными осадками или высокой влажностью воздуха ССГК подвергаются воздействию влаги, что может привести к снижению прочности грунтовой матрицы, разрушению связующих компонентов, а также образованию трещин или полному разрушению кирпича. Поэтому для оценки влияния водопоглощения на прочность ССГК при сжатии и для сравнения с их прочностью в сухом состоянии образцы также испытывались во влажном состоянии (рис. 2, b). Образцы были полностью погружены в воду на 24 ч перед испытанием⁶. Прочность на сжатие рассчитывалась по формуле:

$$P_d = \frac{F}{A}; P_w = \frac{F}{A} = \text{Н/мм}^2, \tag{1}$$

где P_d — прочность на сжатие в сухом состоянии, Н/мм²; F — общая приложенная нагрузка, Н; A — площадь основания кирпича, мм²; P_w — прочность на сжатие во влажном состоянии, Н/мм².

Предел прочности при изгибе (модуль разрыва). Прочность при изгибе, часто называемая модулем упругости при изгибе, представляет собой важную механическую характеристику, определяющую способность материала противостоять растрескиванию и разрушению под действием изгибающих напряжений. Такие напряжения могут возникать вследствие ветровых нагрузок, термических воздействий, неравномерных осадков основания и сейсмической актив-

ности факторов, наиболее часто наблюдаемых в несущих и ненесущих стенах.

Эта прочность кирпичей установлена методом трехточечного изгиба в соответствии со Стандартом ASTM C67/C67M-19, а также Стандартами^{1, 6} с использованием ручного гидравлического испытательного пресса. При этом кирпичи размещались в испытательном устройстве таким образом, чтобы имитировать их положение в стене (рис. 3).

В ходе испытания нагрузка постепенно прикладывалась к середине образца до его разрушения. Прочность при изгибе f_t рассчитывалась по формуле:

$$f_t = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot d^2} = \text{Н/мм}^2, \tag{2}$$

где f_t — прочность при изгибе, Н/мм²; F — приложенная разрушающая нагрузка, Н; l — эффективный пролет кирпича, мм; b — ширина кирпича, мм; d — толщина кирпича, мм.

Водопоглощение. Водопоглощение является критически важным показателем долговечности ССГК, поскольку напрямую влияет на их устойчивость к морозу, эрозии, выветриванию и долгосрочную структурную целостность. В регионах с высокой влажностью или обильными атмосферными осадками чрезмерное водопоглощение может привести к разбуханию, растрескиванию, снижению прочности и сокращению срока службы изделий. Необходимо измерять интенсивность водопоглощения глиняных кирпичей независимо от содержания глины и цемента. Таким образом, оценка как капиллярного, так

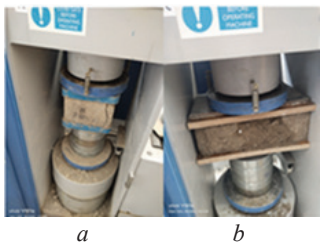


Рис. 2. Испытания ССГК на сжатие: а — в сухом состоянии; b — во влажном состоянии
Fig. 2. Show the compression tests on compressed stabilized earth bricks: a — dry state; b — wet state



Рис. 3. Испытание ССГК на прочность при изгибе
Fig. 3. Illustrates the flexural strength test on compressed stabilized earth brick

и общего (полного) водопоглощения предоставляет ценную информацию о качестве стабилизации и пригодности ССГК для применения в различных климатических условиях. Согласно работе С.Т.С. Beckett и соавт. [18], испытание на капиллярное впитывание является методом оценки долгосрочной долговечности и может применяться для прогнозирования поведения материалов в условиях умеренного климата. В отличие от него, испытания на полное погружение и ускоренную эрозию относятся к категории краткосрочных методов, предназначенных для оценки эффективности стабилизатора и, скорее всего, для моделирования экстремальных воздействий. Неточных или ошибочных оценок устойчивости блоков к выветриванию можно избежать путем одновременного испытания нескольких механизмов разрушения [19]. С. Турсо и соавт. [20] исследовали влияние текстуры заполнителей на водопоглощение и установили, что кирпичи с более мелкими заполнителями демонстрируют более высокую скорость водопоглощения как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе по сравнению с образцами, содержащими более крупные заполнители.

В данном исследовании образцы ССГК были испытаны на общее водопоглощение и капиллярное впитывание (рис. 4). Для проведения испытаний кирпичи высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 24 ч, после чего взвешивали в обоих экспериментах. Согласно работе⁵, для испытания на капиллярное впитывание кирпичи погружали в воду на глубину примерно 1 см на 24 ч, после чего их взвешивали. Для определения полного водопоглощения кирпичи полностью погружали в воду на 24 ч, а затем удаляли с их поверхности избыточную влагу (например, промокивая влажной тканью) перед взвешиванием.

Значения капиллярного и общего водопоглощения, выраженные в процентах, рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{w_w - w_d}{w_d} \cdot 100, \quad (3)$$

где W — поглощенная вода, %; w_w — влажный вес кирпича, кг; w_d — сухой вес кирпича, кг.

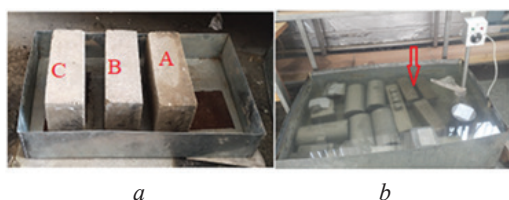


Рис. 4. ССГК для испытания на капиллярное водопоглощение (а); ССГК, полностью погруженные в воду, для испытания на полное водопоглощение (б)

Fig. 4. Shows: compressed stabilized earth bricks (CSEB) for capillary water absorption (a); CSEB full immersed in water for total water absorption (b)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прочность на сжатие. Прочность на сжатие — фундаментальная механическая характеристика, используемая для оценки структурной пригодности и долговечности строительных материалов. Результаты испытаний на сжатие для ССГК в сухом и во влажном состояниях с учетом типа стабилизатора и его содержания, %, представлены на рис. 5. Прочность при сжатии как в сухом, так и во влажном состоянии является критическим показателем эксплуатационных характеристик материала в различных климатических условиях. Снижение прочности во влажном состоянии позволяет оценить минимальные эксплуатационные возможности кирпичей в наиболее неблагоприятных условиях. Результаты, приведенные на рис. 5, показывают, что прочность на сжатие у образцов А, В и С снизилась во влажном состоянии на 31–25 % соответственно, тогда как у образца D — всего на 2,32 %. Такое снижение указывает на то, что влажность оказывает влияние на структурную целостность кирпичей.

Прочность на сжатие в сухом состоянии составила от 5,61 МПа (нестабилизированный образец) до 10,20 МПа (4 % извести + 6 % цемента), что свидетельствует о значительном улучшении прочностных характеристик с увеличением содержания стабилизатора. Эти значения как в сухом, так и во влажном состоянии превышают минимальный предел 5 МПа, рекомендованный стандартами^{1, 6, 7, 8, 9}, для несущей грунтовой кладки, что подтверждает возможность применения должным образом стабилизированных ССГК в конструкционных целях.

Между образцами А (2 % извести + 3 % цемента) и D (5 % цемента) наблюдается разница в прочности на сжатие в сухом состоянии. Несмотря на то, что образец D содержит больше цемента, его прочность оказалась ниже, чем ожидалось. Это может быть обусловлено различиями в насыпной плотности, недостаточным уплотнением, неточностями при смешивании компонентов или неоптимальными условиями твердения. Однако образец D демонстрирует значительно более высокую сохранность прочности во влажном состоянии: потеря прочности составила всего 2,33 %, в то время как у образца А она достигла 31,63 %. Такая высокая влагостойкость объясняется повышенным содержанием цемента

⁷ Shrestha H.D. Standard norms and specification for CSEB block. CSEB Green Buildings in Nepal // Government of Nepal Ministry of Education Department of Education. 2012. Pp. 7–10.

⁸ IS: 1725–1982. Indian Standard Specification for soil based blocks used in general building construction // Bureau of Indian Standards, first revision (Reaffirmed 2002). 5 p.

⁹ SLS 1382 Part I. Specification for compressed stabilized earth blocks. Part 1: Requirements // Sri Lanka Standards Institution. Issue 16. June 2024. URL: https://iesl.lk/SLEN/61/Compressed_Stabilized_Earth_Blocks.php



Рис. 5. Прочность на сжатие в сухом и во влажном состоянии, МПа

Fig. 5. Show, dry compression strength and wet compression strength, MPa

в образце D, который способствует более эффективному связыванию глинистых частиц и улучшает целостность и сцепление грунтовой матрицы. Кроме того, кирпичи были испытаны на прочность на сжатие через 56 сут, что выявило увеличение прочности в сухом состоянии на 8–27 % по сравнению с 28-суточными значениями. Это улучшение можно объяснить продолжающейся гидратацией цемента и образованием дополнительных продуктов гидратации, которые повышают общую структурную стабильность и долговечность кирпичей.

Предел прочности при изгибе (модуль разрыва). Из результатов (рис. 6) следует, что прочность кирпича при изгибе возрастает при введении стабилизаторов: при переходе от нестабилизированного образца к образцу с максимальным содержанием стабилизатора прочность увеличилась на 273 % (0,45–1,68 МПа). При этом рост содержания стабилизатора в пределах стабилизированных составов привел к дополнительному увеличению прочности примерно на 95 % (0,86–1,68 МПа). Даже у не-

стабилизированного сжатого грунтового кирпича (СГК, 0 % стабилизатора) зафиксирована прочность при изгибе на уровне 0,45 МПа, что свидетельствует о наличии определенной связности. Это может быть обусловлено адгезией глинистых частиц и трением между песчаными зернами, возникающими вследствие эффективного давления уплотнения, приложенного при формовании.

Результаты показывают, что незначительное введение цемента ($\geq 3\%$) существенно улучшает прочность при изгибе кирпича из стабилизированной глины. Так, при использовании 5 % цемента (образец D) прочность на сжатие оказалась примерно на 17 % ниже, чем у образца A (2 % извести + 3 % цемента), в то время как его прочность при изгибе была на 31 % выше. Это подтверждает, что увеличение содержания цемента оказывает особенно сильное положительное влияние на прочность при изгибе.

Согласно стандартам^{1, 6}, в данном исследовании применение небольшого количества стаби-

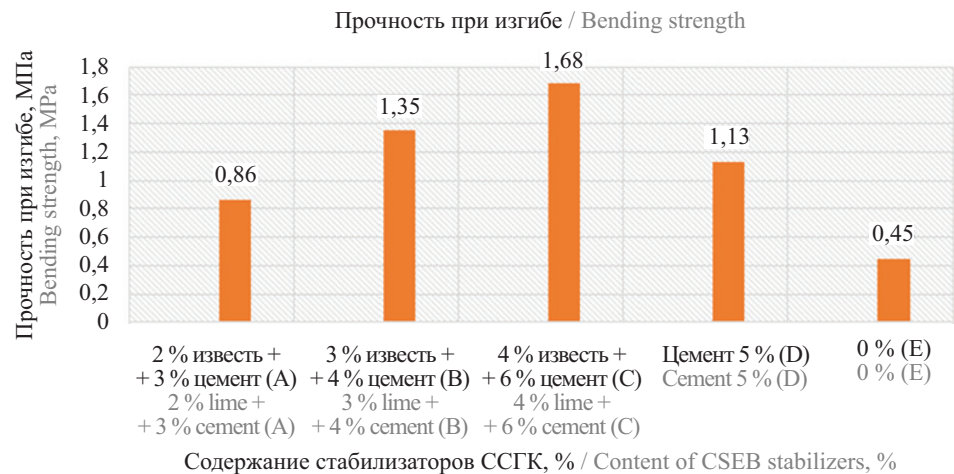


Рис. 6. Прочность кирпича при изгибе, МПа

Fig. 6. Shows the flexural tensile strength of bricks, MPa

лизатора (2 % извести + 3 % цемента) позволило достичь прочности при изгибе, соответствующей минимальным требованиям для кирпичей категорий В и С. В свою очередь состав с 4 % извести и 6 % цемента удовлетворил минимальному требованию по прочности при изгибе для кирпичей категории А по тем же стандартам.

Водопоглощение. Результаты (рис. 7) показывают, что, вопреки ожиданиям, общее водопоглощение увеличилось с 9,41 до 10,95 % при повышении содержания цемента и извести в кирпичах. Однако это изменение оказалось относительно незначительным: стандартное отклонение (СО) составило 0,64 %, а коэффициент вариации (КВ) — 6,28 %, что свидетельствует о высокой однородности свойств всех образцов.

Как отмечает F.G. Bell [7], при добавлении извести в глинистый грунт ионы кальция снижают пластичность, делая грунт более рыхлым и удобоукладываемым. Этот процесс способствует флокуляции глинистых частиц, в результате которой формируются агрегаты (структурные комки). Флокуляция может также приводить к образованию микротрещин в матрице кирпича в процессе сушки или твердения, что повышает проницаемость и, как следствие, увеличивает водопоглощение.

Несмотря на незначительный рост общего водопоглощения, прочность на сжатие не снизилась и осталась в пределах, допустимых стандартами^{1, 6, 7, 8}. Как показано на рис. 6, увеличение содержания стабилизаторов (извести и цемента) привело к повышению прочности как в сухом, так и во влажном состоянии, а также к росту прочности при изгибе. Это свидетельствует об улучшении связывания частиц и повышении структурной целостности за счет образования продуктов гидратации и цементации.

Напротив, капиллярное водопоглощение демонстрировало обратную тенденцию: оно снижа-

лось с увеличением содержания стабилизатора. Это особенно заметно при сравнении образца D (5 % цемента) и образца А (2 % извести + 3 % цемента): капиллярное водопоглощение у образца D оказалось на 13 % ниже, чем у образца А.

Это более низкое капиллярное водопоглощение может быть связано с более высокой плотностью образца D в сухом состоянии — на 4,67 % выше, чем у образца А. Следовательно, повышенная плотность и сниженная пористость способствуют уменьшению капиллярного подъема воды в кирпиче.

В целом результаты по капиллярному водопоглощению характеризуются низкой вариабельностью: СО составляет 0,62 %, КВ — 6,9 %, что свидетельствует о стабильных и однородных свойствах материала.

Установлено, что плотность материала в сухом состоянии играет значительную роль в водопоглощении, поскольку вода заполняет поры и пустоты в матрице. Разница в сухой плотности между испытанными кирпичами была относительно небольшой (СО = 40,72 кг/м³, КВ = 2,04 %), что указывает на равномерное уплотнение и гомогенность смеси. Тем не менее даже незначительные различия в плотности могут влиять на структуру пор и связность матрицы, оказывая воздействие как на общее, так и на капиллярное водопоглощение.

Результаты показывают, что значения водопоглощения ССГК ниже максимального предела, установленного в литературе: так, в работе⁶ указано значение 20 %, а в работах^{1, 7, 8} — 15 %.

В ходе капиллярного испытания скорость водопоглощения у образцов D (5 % цемента) и А (2 % извести + 3 % цемента) была выше, чем у образцов В и С. Однако через 24 ч кирпичи D и А были увлажнены примерно на 98 %, в то время как кирпичи В и С — на 85 и 75 % соответственно, как показано

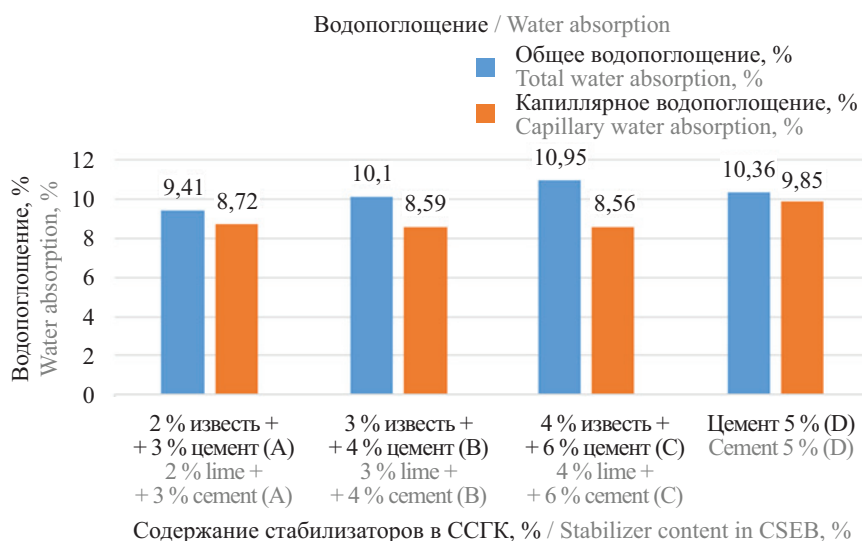


Рис. 7. Общее и капиллярное водопоглощение ССГК, %

Fig. 7. Shows the total and capillary water absorption in compressed stabilized earth bricks, %



Рис. 8. Влажное состояние кирпича после капиллярного водопоглощения

Fig. 8. Shows the wet state of bricks after capillary water absorption

на рис. 8. Эта разница может быть обусловлена различным содержанием стабилизаторов.

В присутствии воды цемент вступает в реакцию с глинистыми минералами, образуя связи, которые способствуют сцеплению частиц. Глинистые частицы, обладающие отрицательным поверхностным зарядом, высокой удельной поверхностью и склонностью к набуханию, характеризуются выраженными водопоглощающими и водоудерживающими свойствами. При низком содержании цемента доля глинистых частиц, химические свойства которых практически не изменяются под действием цемента, оказывается выше. Следовательно, это приводит к увеличению капиллярного водопоглощения вследствие преобладания гигроскопичности глины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование, выполненное с использованием небольших количеств извести и цемента, было направлено на оценку механических свойств и водопоглощения ССГК. Результаты показали следующее:

- прочность на сжатие в сухом состоянии варьировалась от 5,61 МПа (нестабилизированный образец) до 10,20 МПа (4 % извести + 6 % цемента), что свидетельствует о значительном улучшении прочностных характеристик с увеличением содержания стабилизатора;
- значения прочности на сжатие как в сухом, так и во влажном состоянии превышают минимальный предел 5 МПа, рекомендованный стандартами^{1, 6, 7, 8, 9}, для несущей грунтовой кладки, что подтверждает возможность применения должным образом стабилизированных ССГК в строительных конструкциях;
- при использовании минимального содержания стабилизатора (2 % извести + 3 % цемента) кирпичи достигли высокой прочности на сжатие как в сухом, так и во влажном состоянии, что соответствует требованиям стандартов. Кроме того, их прочность при изгибе соответствует минимальному значению, установленному для категорий В и С сжатых стабилизированных грунтовых кирпичей в стандартах^{1, 7};
- можно сделать вывод, что минимальное введение стабилизаторов эффективно улучшает механические характеристики ССГК;

- при использовании 4 % извести и 6 % цемента прочность при изгибе соответствовала минимальным требованиям для категорий А и В, в то время как прочность на сжатие достигла значений, характерных для категории А сжатых стабилизированных грунтовых кирпичей, согласно стандартам^{1, 7}. Это свидетельствует об улучшенных структурных характеристиках, пригодных для применения в сложных строительных условиях;

- при сравнении прочности при изгибе образцов А и D, содержащих в сумме 5 % стабилизаторов, прочность образца А (0,86 МПа) оказалась ниже, чем у образца D (1,13 МПа). Это указывает на то, что цемент оказывает более значительное влияние на прочность при изгибе, чем известь, в матрице кирпича;

- прочность кирпича на сжатие возрастала со временем: через 56 сут она увеличилась на 8–27 % по сравнению с 28-суточными значениями;

- общее водопоглощение незначительно возросло при добавлении стабилизаторов, однако его максимальное значение остается ниже пределов, установленных международными стандартами, и не оказывает негативного влияния на прочность кирпича на сжатие во влажном состоянии, согласно этим стандартам.

Для детального анализа грунта и влияния стабилизаторов на микроструктуру кирпича необходимы такие методы, как рентгеновская дифракция и сканирующая электронная микроскопия с рентгенофазовым анализом. Но проведение таких исследований ограничено отсутствием соответствующего аналитического оборудования.

В целом результаты исследования показали, что при использовании небольших количеств стабилизаторов ССГК могут обладать значительным потенциалом в качестве экологически устойчивого, экономически выгодного и практически применимого строительного материала. Применение местных сырьевых ресурсов позволяет существенно снизить стоимость строительства и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными обожженными глиняными кирпичами и бетонными блоками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Bell F.G. *Engineering Treatment of Soils*. London, CRC Press, 1993; 320. DOI: 10.1201/97814-82288971
2. Kamal M.A. The Study of Thermal Mass as a Passive Design Technique for Building Comfort and Energy Efficiency. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2011; 5(1). DOI: 10.17265/1934-7359/2011.01.009
3. Kamal M.A. Analyzing the Potential of Compressed earth blocks as a feasible and sustainable building material. *Architecture Engineering and Science*. 2023; 4(2):62-71. DOI: 10.32629/aes.v4i2.1183
4. Walker P.J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*. 1995; 17(4):301-310. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00019-9
5. Nagaraj H.B., Sravan M.V., Arun T.G., Jagadish K.S. Role of lime with cement in long-term strength of Compressed stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2014; 3(1):54-61. DOI: 10.1016/j.ijse.2014.03.001
6. Deboucha S., Hashim R. A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*. 2011; 6(3).
7. Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*. 1996; 42(4):223-237. DOI: 10.1016/0013-7952(96)00028-2
8. Raheem A.A., Bello O.A., Makinde O.A. A comparative study of cement and lime stabilized lateritic interlocking blocks. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 2010; 11(2):27-34.
9. Alavéz-Ramírez R., Montes-García P., Martínez-Reyes J., Altamirano-Juárez D.C., Gochi-Ponce Y. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*. 2012; 34:296-305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072
10. Khatib J.M., Ellis E.A. The influence of soil properties on compressive strength of stabilized earth blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2018; 7(1):140-151.
11. Acosta L.A., Côté P. Effect of soil composition on the mechanical properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*. 2016; 113:246-253.
12. Rahman M.M., Rashiduzzaman M.M., Akhand F.Z., Kabir K.B. Compressed Stabilized Earth Block: A Green Alternative for Non-Load Bearing Building Block in Developing Countries Like Bangladesh. *American Chemical Science Journal*. 2016; 12(3):1-10. DOI: 10.9734/ACSJ/2016/23071
13. Bakar S.K.A., Abdullah A.H. Simulation of Thermal Performance in an Office Building. *Business Engineering and Industrial Applications Colloquium*. 2012; 318-323. DOI: 10.1109/BEIAC.2012.6226074
14. Abdullah A.H., Bakar S.K.A., Rahman I.A. Indoor thermal performance of an office building using conventional brick versus interlocking compressed earth brick (ICEB) wall. *International Journal of Construction Technology and Management*. 2013; 1(1):22-27.
15. Avizovas R., Baskutis S., Navickas V., Tamandl L. Effect of Chemical Composition of Clay on Physical-Mechanical Properties of Clay Paving Blocks. *Buildings*. 2022; 12(7):943. DOI: 10.3390/buildings12070943
16. Narloch P.L., Woyciechowski P., Kotowski J., Gawruciencow I., Wojcik E. The effect of soil mineral composition on the compressive strength of cement stabilized rammed earth. *Materials*. 2020; 13(2):324. DOI: 10.3390/ma13020324
17. Riza F.V., Rahman I.A., Zaidi A.M.A. Preliminary study of compressed stabilized earth brick (CSEB). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(9):6-12.
18. Beckett C.T.S., Jaquin P.A., Morel J.C. Weathering the storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. *Construction and Building Materials*. 2020; 242:118098. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118098
19. Panagiotou R., Kyriakides M.A., Illampas R., Ioannou I. An experimental approach for the investigation of the performance of non-stabilized Compressed Earth Blocks (CEBs) against water-mediated weathering. *Journal of Cultural Heritage*. 2022; 57(2):184-193. DOI: 10.1016/j.culher.2022.08.009
20. Turco C., Paula Junior A., Jacinto C., Fernandes J., Teixeira E., Mateus R. Influence of Particle Size on Compressed Earth Blocks Properties and Strategies for Enhanced Performance. *Applied Sciences*. 2024; 14(5):1779. DOI: 10.3390/app14051779

Поступила в редакцию 15 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Насратулла Абдул Гафур Насрат** — аспирант, кафедра технологии строительства и конструкционных материалов, Инженерная академия; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0006-3764-1022; nasratullahnasrat609@yahoo.com;

Мохаммед Ибрагим Абу Махади — кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительства и конструкционных материалов, Инженерная академия; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; SPIN-код: 2612-5647, Scopus: 57212344591, ResearcherID: AAI-2235-2021, ORCID: 0000-0002-4323-9818; abu-makhadi-mi@rudn.ru;

Махмуд Абдельсалам Ареф Обейд — аспирант, кафедра технологии строительства и конструкционных материалов, Инженерная академия; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-7562-5652; Mahmoud.obeid@yandex.com.

Вклад авторов:

Насрат Н.А.Г. — разработка плана исследования, отбор материала, инициация исследования, проведение экспериментов и анализ результатов.

Абу Махади М.И. — методологическое руководство и руководство по подготовке статьи.

Обейд М.А.А. — анализ литературы, участие в технической подготовке статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received August 15, 2025.

Adopted in revised form on November 21, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

B I O N O T E S : **Nasratullah Abdul Ghafoor Nasrat** — postgraduate student, Department of Construction Technology and Structural Materials, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-3764-1022; nasratullahnasrat609@yahoo.com;

Mohammed Ibrahim Abu Mahadi — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Technology and Structural Materials, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; SPIN-code: 2612-5647, Scopus: 57212344591, ResearcherID: AAI-2235-2021, ORCID: 0000-0002-4323-9818; abu-makhadi-mi@rudn.ru;

Mahmoud Abdelsalam Aref Obeid — postgraduate student, Department of Construction Technology and Structural Materials, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7562-5652; Mahmoud.obeid@yandex.com.

Author Contributions:

Nasratullah Abdul Ghafoor Nasrat — developed the research plan, selected materials for the study, initiated the research, conducted the experiments, and analyzed the results.

Mohammed Ibrahim Abu Mahadi — provided methodological and an article preparation guidance.

Mahmoud Abdelsalam Aref Obeid — curated relevant literature and contributed to the technical aspects of the article.

The authors declare no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106

«Зеленая» крыша как инструмент экологической безопасности городских территорий

Валерий Николаевич Азаров¹, Елена Владимировна Сысоева²,
Дена Карим-Султанович Батаев³

¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия;

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

³ Комплексный научно-исследовательский
институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН); г. Грозный, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние «зеленых» крыш на экологическую безопасность городов. Частицы мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} влияют на здоровье человека, уменьшая не только продолжительность трудоспособного периода жизни, но и угрожая жизни. Поэтому снижение концентрации этих твердых частиц (ТЧ) в воздухе городских территорий — серьезная проблема специалистов в области техносферной безопасности. Одним из возможных решений проблемы является повсеместное внедрение «зеленых» крыш для озеленения городов.

Материалы и методы. Изучается способность «зеленых» крыш снижать плотность твердых взвешенных частиц PM различной фракции и связанных с ними микроэлементов несколькими видами многолетних растений в течение весны, лета и осени. Детоксикация воздуха окружающей городской среды может происходить благодаря фиторемедиации, позволяющей использовать растения для снижения загрязнения воздуха. Растения, находящиеся на уровне крыш зданий общественного назначения, могут улавливать тяжелые металлы (ТМ) из воздуха, особенно на селитебных территориях, где крыши зданий имеют значительные площади. Проведена оценка способности растительного покрова улавливать частицы мелкодисперсной пыли в воздушной среде городских территорий на основе анализа восьми видов растений. Для экспериментального исследования выбраны растения с листьями с разнообразной морфологией, которая оказывает влияние на улавливание ТМ.

Результаты. Исследование подтверждает важность выбора растений с особыми структурными особенностями для зеленой городской инфраструктуры. Высокие уровни ТМ на «зеленых» крышах обнаружены в летний период года, что связано с условиями окружающей среды и активностью работы промышленных предприятий.

Выводы. На содержание ТЧ в растениях влияет также смена времен года. Исследование подчеркивает важность изучения удержания ТМ частицами разного размера растениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: «зеленая» крыша, экологическая безопасность городских территорий, мелкодисперсная пыль $PM_{2,5}$ и PM_{10} , загрязнение города, урбанизация, городской остров тепла, фиторемедиация, метод селективного растворения листа с применением хлороформа

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., Сысоева Е.В., Батаев Д.К.-С. «Зеленая» крыша как инструмент экологической безопасности городских территорий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 95–106. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Сысоева, SysoevaEV@mgisu.ru.

Green roof as an environmental safety tool for urban areas

Valery N. Azarov¹, Elena V. Sysoeva², Dena K.-S. Bataev³

¹ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;

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

³ Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CI RAS); Grozny, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the impact of “green” roofs on the environmental safety of cities. Since fine dust particles $PM_{2.5}$ and PM_{10} seriously affect human health, reducing not only the length of the working age, but also threatening life at all. Therefore, reducing the concentration of these solid particles in the air of urban areas is a serious problem for specialists in the field of technosphere safety. One possible solution to this problem is the widespread use of green roofs to green cities.

Materials and methods. The proposed work studies the ability of green roofs to reduce the density of particulate matter PM of various fractions and associated trace elements by several species of perennial plants during spring, summer and autumn. Detoxification of the air of the surrounding urban environment can occur due to phytoremediation, which allows the use of plants in reducing air pollution. Plants located at the level of the roofs of public buildings can capture heavy metals from the air, especially in residential areas where the roofs of buildings have significant areas. The paper assesses the ability of vegetation cover to capture fine dust particles in the air of urban areas based on the analysis of eight plant species. The experimental study focuses on plants with leaves of diverse morphology, which affects the capture of heavy metals.

Results. The study confirms the importance of choosing plants with special structural features for green urban infrastructure. High levels of heavy metals on green roofs were found in the summer season, which is associated with environmental conditions and the activity of industrial enterprises.

Conclusions. The content of solid particles in plants is also affected by the changing seasons. Rainfall in spring washes particles off the leaves, in summer gardening work captures and increases the level of density of solid dust particles. The study highlights the importance of studying the retention of heavy metals by particles of different sizes in plants.

KEYWORDS: green roof, environmental safety of urban areas, fine particulate matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} , urban pollution, urbanization, urban heat island, phytoremediation, selective chloroform leaf dissolution method

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., Sysoeva E.V., Bataev D.K.-S. Green roof as an environmental safety tool for urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):95-106. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Sysoeva, SysoevaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Частицы мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) представляют собой одну из основных составляющих загрязнения воздуха, оказывая серьезное воздействие на здоровье человека и экологические системы городской среды. Снижение их концентрации в воздухе городских территорий — одна из важнейших задач специалистов в области техносферной безопасности.

Загрязнение территорий увеличивается благодаря нарастающему росту строительства в больших и крупных городах России, увеличению плотности транспортной системы и т.д. При этом, по данным Росстата, изменение численности за последние 30 лет не произошло. Согласно последним сведениям, с 1994 г. на территории России проживало 148 355 867 чел., что на 2 205 078 чел. больше, чем на 2024 г., т.е. на 1,5 % меньше. Резкое уменьшение произошло в 2009 г., когда население уменьшилось на 4 %, после чего начался медленный и незначительный рост численности россиян.

Одновременно с уменьшением численности коренного населения России численность автомобильного транспорта в России с 1990 по 2015 г. увеличилась с 8,7 до 44,3 млн. Парк автомобилей продолжает расти и в последнее десятилетие до 46,8 млн, т.е. за последние 35 лет парк личного автотранспорта вырос в 5 раз.

Поскольку увеличение объемов строительства приводит к уменьшению парковых зон, природного

и искусственного озеленения, необходимо принять меры к дополнительному озеленению городских территорий, которые смогут компенсировать потерянные площади на городских площадках строительства.

В крупных городах большие площади занимают торговые центры и другие здания общественного назначения (больницы, детские сады, общеобразовательные учреждения), имеющие значительные площади крыш. Эти территории дают повышение температурных полей вокруг придомовой территории и концентрируют пылевые загрязнения. Все это доказывает необходимость использования таких крыш для эксплуатации их в качестве улавливателей пыли и уменьшения температуры благодаря естественному травяному покрову.

Быстрый рост городского населения в г. Москве ускорил внедрение «зеленых» крыш для озеленения городов на юге России. Это имеет экологические преимущества и помогает снизить негативные последствия урбанизации, такие как загрязнение воздуха и эффект городского острова тепла [1–3]. «Зеленые» крыши — это одно из решений для сохранения зеленых насаждений в городах с высокой плотностью населения и улучшения окружающей среды. Устройство данных конструкций на зданиях и сооружениях улучшает экологию городов, помогая противостоять изменению климата и снижая загрязнение воздуха твердыми частицами [4, 5].

Антропогенная деятельность на городских территориях (сжигание топлива, промышленность, стро-

ительство) создает загрязнение взвешенными веществами, имеющими в составе различные химические элементы. Наиболее опасными для здоровья городского населения являются частицы мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} , так как они могут попадать в дыхательную систему человека [6–8].

Концентрация взвешенных веществ в воздухе городской территории зависит от сезонности, топографии территории и метеорологических показателей [9]. Химический состав включает сульфаты, нитраты, углеводороды, металлы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучается способность конструкций «зеленых» крыш снижать уровень загрязнения воздуха путем анализа улавливания частиц РМ и связанных с ними микроэлементов восемью видами многолетних растений в течение весны, лета и осени. Полученные результаты подчеркивают значительную вариативность в улавливании РМ как внутри видов, так и в зависимости от сезонных изменений. Особенно высокие показатели были зафиксированы летом из-за увеличения плотности листвы и загрязнения окружающей среды.

Наиболее высокий уровень улавливания тяжелых металлов (ТМ) в РМ показали два вида растений — *Sedum spectabile* (очиток видный) и *Spiraea japonica* (спирея японская) благодаря их богатому восковому покрытию и густой листве. В то же время *Betula nana* (береза карликовая) продемонстрировала высокую способность улавливать такие элементы, как марганец и цинк. Сезонные изменения в концентрации частиц РМ, связанные с метеорологическими показателями территории субтропического климата в г. Москве, и изменения содержания воска на листовом покрове растений в осенний период подчеркивают важность адаптивных свойств растений для эффективного улавливания загрязняющих веществ. Эти выводы подчеркивают высокий уровень способности «зеленых» крыш в улучшении качества воздуха в городской среде и необходимость разработки стратегий, учитывающих характеристики конкретных видов растений для максимальной эффективности фиторемедиации круглый год. Расширение применения разнообразной растительности на «зеленых» крышах может значительно увеличить их положительное воздействие на окружающую городскую среду и здоровье населения.

Растения вносят существенный вклад в снижение загрязнения воздуха через фиторемедиацию — экологически безопасный подход, использующий растения для детоксикации окружающей среды [10].

Исследования показывают, что растения могут накапливать тяжелые металлы в зависимости от формы листьев и содержания воска [11–13]. «Зеленые» крыши могут быть полезны для фильтрации и улавливания ТМ из воздуха в городских районах, но требуются оценка их эффективности в зависимо-

сти от климатических и метеорологических условий конкретной территории и разработка стратегии по озеленению для совершенствования системы экологической безопасности городской воздушной среды.

Цель исследования — оценка способности растительного покрова улавливать частицы мелкодисперсной пыли в воздушной среде городских территорий и разработка стратегии повышения уровня экологической безопасности.

Экспериментальное исследование по оценке улавливания растительным покровом взвешенных веществ проводилось в весенне-осенний период 2024 г. (май – сентябрь) в г. Москве. Образцы растений для изучения собирались на «зеленой» крыше административно-делового центра «Шереметьевская, 34». В период исследования наблюдался наиболее теплый весенне-осенний сезон за всю историю метеорологических наблюдений в г. Москве. Зафиксированы следующие метеорологические условия: в весенний период (май) — 88 мм осадков, средняя температура воздуха +16 °С, влажность 45–50 %, скорость ветра 5–6 м/с; в летний период (июнь – август) — 144,9 мм осадков, средняя температура воздуха +26 °С, влажность 66 %, скорость ветра 2–3 м/с; в осенний период (сентябрь) — 144,9 мм осадков, средняя температура воздуха +18 °С, влажность 62 %, скорость ветра 3–4 м/с.

Для исследования выбраны следующие виды растений: *Betula nana* (береза карликовая), *Cornus sericea* (свида шелковистая), *Cotoneaster dammeri* C.K. Schneid (кизильник Даммера), *Heimerocallis x hybrida* Hort (лилейник гибридный), *Rosa rugosa* Thunb (шиповник морщинистый), *Salix alba* L. (ива белая), *Sedum spectabile* (очиток видный) и *Spiraea japonica* (спирея японская).

Данные виды растений были отобраны из-за их признанного потенциала в области фиторемедиации и способности к адаптации к городской среде [14, 15]. Кроме того, их листья имеют разнообразную морфологию, которая оказывает влияние на улавливание ТМ, что представлено в табл. 1 [16].

Отбор проб проводился трижды в разные даты: в начале вегетационного периода в мае, во время пика вегетации в августе и в конце вегетационного периода в сентябре. Для каждого вида собирали по 20–30 зрелых листьев, которые помещали в бумажные конверты. Листья отбирали у здоровых растений, не имеющих признаков болезней или заражения вредителями, чтобы обеспечить целостность образцов. Собранные листья были полностью сформированными и одинакового возраста, что гарантировало однородность их зрелости на момент отбора проб.

Сбор с поверхности листьев твердых частиц (ТЧ) осуществлялся посредством систематической промывки листа с целью минимизации его повреждения. Каждый образец листа погружался в 200 мл

Табл. 1. Основные морфологические характеристики листьев различных видов растений

Table 1. Main morphological characteristics of leaves of various plant species

Вид растения Plant type	Шероховатость поверхности Surface roughness	Плотность трихом Density of trichomes	Плотность листа Sheet density
Береза карликовая Dwarf birch	Высокая High	Редкая Rare	Средняя Average
Свида шелковистая Svida silky	Низкая Low	Редкая Rare	Высокая High
Кизильник Даммера Dummer's Dogwood	Низкая Low	Отсутствует Absent	Высокая High
Лилейник гибридный Hybrid daylily	Низкая Low	Редкая Rare	Средняя Average
Шиповник морщинистый Rosehip wrinkly	Средняя Average	Плотная Dense	Средняя Average
Ива белая White willow	Низкая Low	Редкая Rare	Средняя Average
Очиток видный Sedum	Низкая Low	Отсутствует Absent	Высокая High
Спирея японская Japanese spiraea	Средняя Average	Редкая Rare	Высокая High

дистиллированной воды и осторожно перемешивался в течение 60 с. Этот процесс способствовал эффективному удалению ТЧ, не затрагивая нижележащие слои воска на поверхности листьев. Подготовленные образцы раствора затем фильтровались через металлическое сито в мензурки. Полученный промывочный раствор был подвергнут последовательной фильтрации с использованием вакуумной установки для фильтрования «Ручей-1». Для обеспечения точных измерений взвешенных веществ применялись различные виды фильтров согласно ГОСТ 12026–76. Исходя из размеров, твердые частицы разделили на три фракции: с диаметром 10–100; 2,5–10 и 0,2–2,5 мкм.

Сначала фильтры высушили в сушильном шкафу при 60 °C в течение 30 мин для удаления остаточной влаги. Этот этап необходим для обеспечения точности измерений. Затем фильтры в течение 60 мин до взвешивания находились в помещении для стабилизации температуры и влажности.

Для точного измерения количества ТЧ в восковом слое эпикуткулы листа использовали метод селективного растворения листа с применением хлороформа. Каждый образец листа промывали в 100 мл хлороформа в течение 45 с для растворения воскового слоя и удаления ТЧ. Полученный раствор, содержащий как растворенный воск, так и внедренные твердые частицы, фильтровали через взвешенный фильтр с последующей сушкой и взвешиванием.

После фильтрации раствор хлороформа переливали в заранее взвешенные стеклянные стаканы и помещали под вытяжной шкаф для полного испарения растворителя и удаления остаточных веществ. После испарения растворителя масса мерных колб была повторно измерена для определения общей массы воска и ТЧ, содержащихся в нем. Этот

метод точно определял количество воска независимо от осажденных ТЧ на поверхности листа.

С целью стандартизации данных о накоплении ТЧ и эпикуткулярной восковой массы требуется провести количественную оценку площади поверхности листьев. Это позволило выразить результаты в расчете на единицу площади и обеспечить сопоставимость между образцами и видами. Каждый образец листа размещался плоско на измерительном устройстве на достаточном расстоянии друг от друга, чтобы исключить контакт с соседними образцами. Каждый лист сфотографирован с высоким разрешением и обработан с помощью программного обеспечения WinFOLIA для расчета площади поверхности. Полученные сведения выражены в квадратных сантиметрах. Затем использована площадь поверхности для нормирования массы мелкодисперсных частиц и массы эпикуткулярного воска, чтобы обеспечить выражение этих значений в микрограммах на квадратный сантиметр для точных межвидовых сравнений.

Для определения содержания микроэлементов в листьях растений собранные образцы сушили на воздухе, далее измельчали в однородный порошок с помощью механической кофемолки для обеспечения однородности образца. Содержание микроэлементов в растительном материале измерялось портативным рентгенофлуоресцентным спектрометром «Метэксперт» от ГК «Южполиметалл-Холдинг» (г. Санкт-Петербург). Спектрометр откалиброван с использованием сертифицированных стандартных образцов и испускал два пучка излучения с интервалами 60 и 120 с. Концентрации химических веществ определялись в мг/кг.

Результаты исследования указывают на существенное изменение общего содержания тяжелых

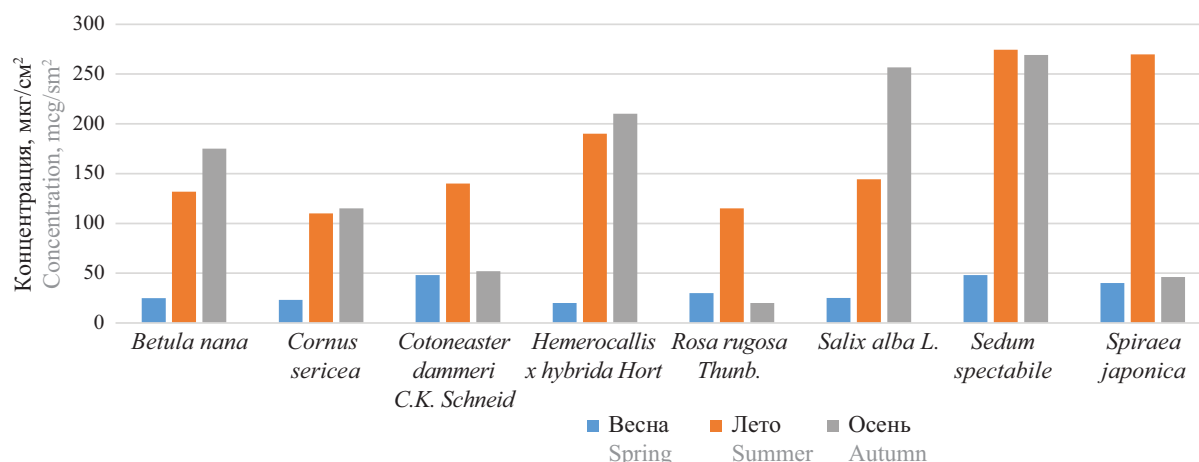


Рис. 1. Показатели общей концентрации твердых частиц, улавливаемых растениями в период исследования

Fig. 1. Indicators of the total concentration of particulate matter captured by plants during the study period

металлов и твердых частиц в различных видах растений и в разные времена года, причем наибольшее содержание ТЧ обычно наблюдается летом. Среди исследованных видов наибольшие значения удержания ТЧ были обнаружены у *S. spectabile* и *S. japonica* в летние месяцы, достигая 274,3 и 259,6 мкг/см² соответственно. Эти показатели значительно превышали уровни, зарегистрированные у видов с наименьшим накоплением, таких как *H. x hybrida* весной (15,1 мкг/см²).

Сезонные изменения в удержании ТМ также варьировались. Весной у различных видов растений обычно наблюдалось снижение концентрации ТМ по сравнению с летом. Например, весной у *Betula nana* концентрация составляла 24,8 мкг/см², в то время как летом она увеличилась до 131,7 мкг/см², что свидетельствует об увеличении удержания на 430 %. Подобные закономерности отмечались и у других видов, что, вероятно, свидетельствует о взаимосвязи между уровнем ТМ в атмосфере и активностью растений.

Вопреки этому, летом повышенная физиологическая активность и полностью развитая листовая поверхность, по всей видимости, значительно увеличивают захват тяжелых металлов, что приводит к максимальному их накоплению в течение этого сезона [17, 18]. На рис. 1 показано накопление $PM_{0,2-100}$ на листьях изучаемых видов растений.

В осенний период содержание ТЧ в атмосфере увеличивалось до уровня 30–50 мкг/м³ для PM_{10} из-за начала отопительного сезона [19]. Метеорологические условия, такие как понижение скорости ветра и температурные колебания, способствуют накоплению загрязнения. Например, вид *S. spectabile* сохраняет стабильный уровень ТЧ к концу вегетационного периода, с уровнем 269,1 мкг/см² осенью, что практически соответствует показателю летом (274,3 мкг/см²), это свидетельствует о 2%-ном снижении. В отличие от этого, у вида *S. alba* наблюдается значительное снижение содержания ТЧ осенью

(56,6 мкг/см²), что на 60 % меньше, чем летний пик (144,2 мкг/см²).

В данном исследовании обнаружены колебания в удержании твердых частиц различных размеров в определенных фракциях — от 10 до 100 мкм, от 2,5 до 10 мкм и от 0,2 до 2,5 мкм. Это свидетельствует о влиянии различных растений, биологических видов и сезонных условий на улавливание и удержание взвешенных частиц в воздухе (рис. 2).

В летний период вид *S. spectabile* показал самую высокую степень улавливания ТЧ среди всех изученных видов, достигая значений 130,2 и 122,4 мкг/см² во фракциях PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$ соответственно. Также высокую сохранность ТМ продемонстрировала *S. japonica* с накоплениями 124,5 мкг/см² в указанных фракциях. Особенно заметны были сезонные колебания в удержании ТМ, причем весной и осенью большинство видов показывали значительно более низкую способность улавливать тяжелые металлы по сравнению с летом.

В ходе исследования *B. nana* было обнаружено существенное увеличение содержания частиц PM_{10-100} (10,1 мкг/см²) в сравнении с весной, когда летом этот показатель достигал 61,5 мкг/см², что на 510 % выше. Это свидетельствует о влиянии сезонного роста на накопление ТЧ. Тем не менее некоторые виды, например *S. spectabile*, сохраняли высокие значения PM даже осенью. В отличие от этого, *R. rugosa* и *S. alba* демонстрировали существенное снижение содержания ТЧ осенью, особенно во фракциях PM_{10-100} и $PM_{0,2-2,5}$. Во всех видах и сезонах фракции PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$ показывали стабильно более высокие уровни удержания по сравнению с фракцией $PM_{0,2-2,5}$.

Исследования подчеркивают важность свойств поверхности листьев, таких как толщина воскового слоя и плотность трихом, для удержания определенных фракций тяжелых металлов. С другой стороны, наблюдается меньшая эффективность удержания фракций *R. rugosa* и *S. alba*, особенно в условиях

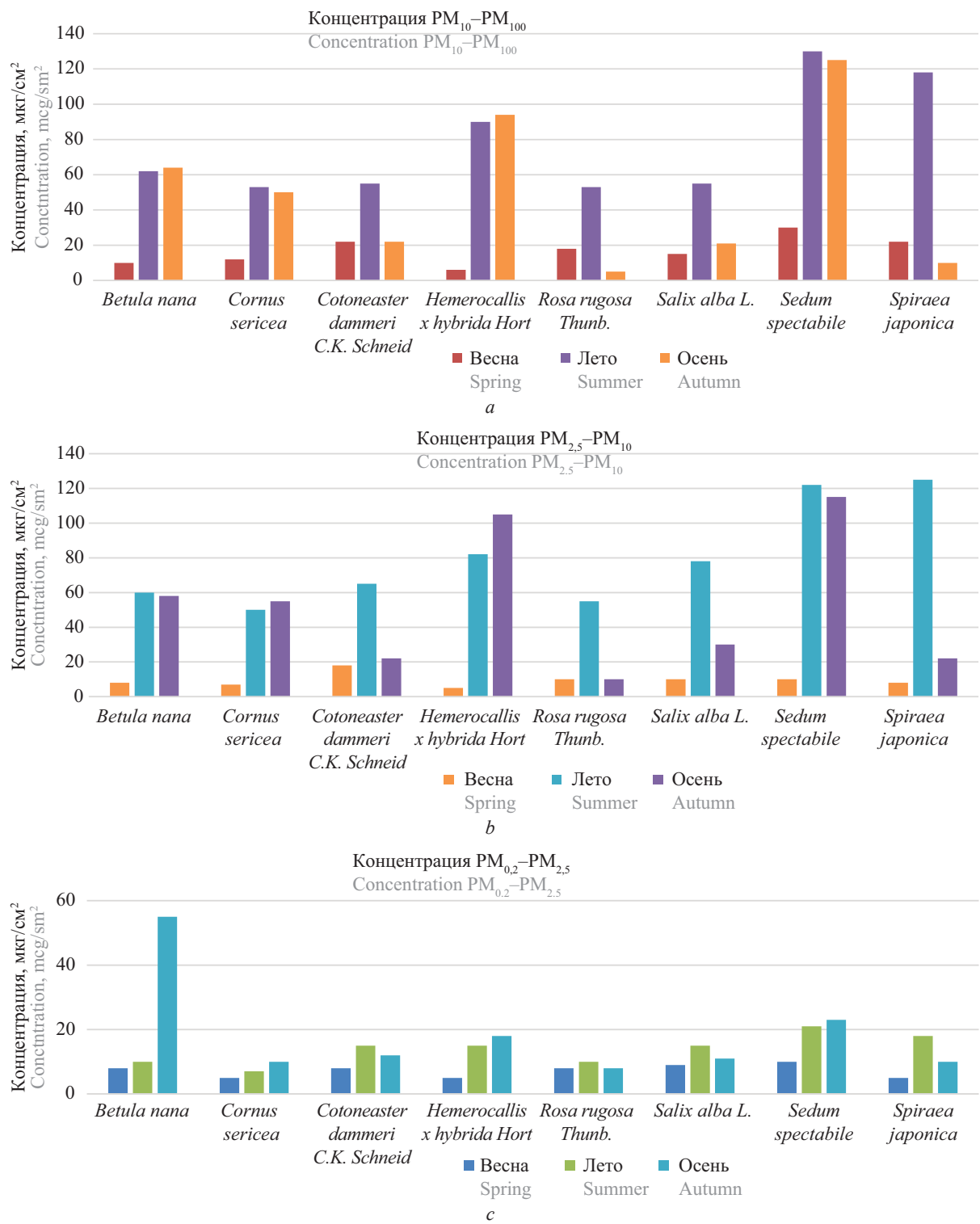


Рис. 2. Показатели концентрации $PM_{0.2}-PM_{100}$, улавливаемых растениями в период исследования

Fig. 2. Concentration of $PM_{0.2}-PM_{100}$ captured by plants during the study period

менее благоприятных сезонов, что может указывать на их ограниченную способность к долгосрочному улавливанию ТМ.

Анализ содержания воска показывает значительные различия между разными видами растений. В частности, у *B. nana* отмечается самый высокий уровень содержания воска, особенно весной,

когда он достигает 581,7 мкг/см², что представлено на рис. 3.

Несмотря на сезонное снижение, уровень содержания воска у *B. nana* остается на относительно высоком уровне в течение всего года, что свидетельствует о его хорошей способности удерживать твердые частицы.

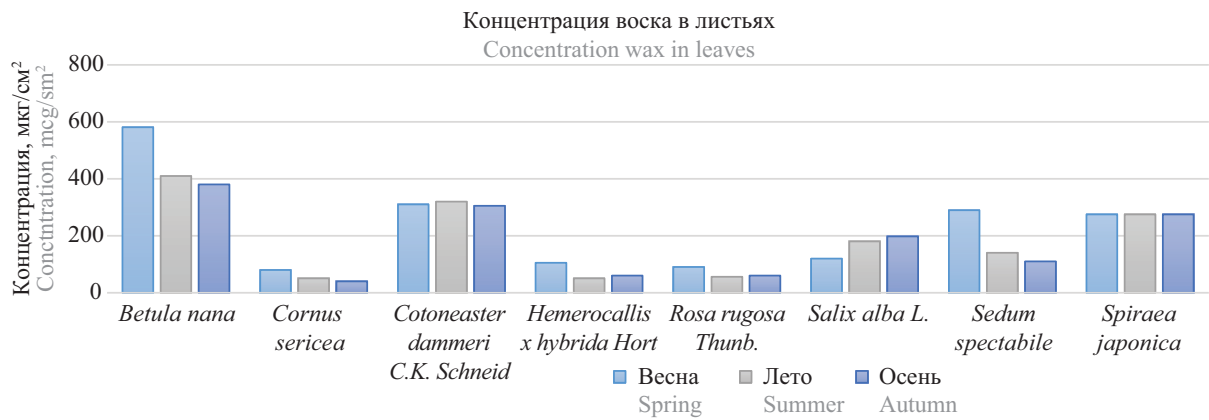


Рис. 3. Концентрация воска в листьях растений в период исследования

Fig. 3. Concentration of wax in plant leaves during the study period

Кроме того, высокое содержание воска также характерно для других видов растений, таких как *C. Dammeri* и *S. japonica*. У этих видов стабильно высокий уровень воска на протяжении всего сезона. В частности, у *S. japonica* наблюдается тенденция к увеличению содержания воска: осенью уровень воска вырос до 275,1 мкг/см², что на 26 % больше, чем ранее. Это может привести к улучшению способности удерживать ТЧ в дальнейшем.

В течение всего сезона *C. sericea* демонстрировала самое низкое содержание воска, достигнув максимального значения 79,5 мкг/см² весной и снизившись на 44 % до 44,8 мкг/см² к осени. *H. x hybrida* и *R. rugosa* также имели относительно низкое содержание воска, немного превышающее уровень *C. sericea*. Например, максимальное содержание

воска у *H. x hybrida* составляло 107,0 мкг/см² весной, с последующим снижением на примерно 47 % до 56,1 мкг/см² летом.

Анализ накопления микроэлементов у различных видов растений в разные сезоны выявил значительную изменчивость содержания марганца (Mn), железа (Fe), меди (Cu) и цинка (Zn). Эта изменчивость обусловлена видоспецифическими особенностями и сезонными условиями окружающей среды, оказывающими влияние на способность растений улавливать и накапливать указанные элементы. Например, накопление марганца различалось в зависимости от вида и времени года, что представлено в табл. 2. У вида *S. japonica* наблюдались стабильно высокие уровни марганца, особенно заметные весной и летом.

Табл. 2. Накопление в растениях различных химических элементов

Table 2. Accumulation of various chemical elements in plants

Виды растений Types of plants	Период исследования Study period	Химические элементы, мкг/г Chemical elements, mcg/g			
		Mn	Fe	Cu	Zn
Береза карликовая Dwarf birch	Весна Spring	58	375	20	473,1
	Лето Summer	99,3	342,7	18,3	721,7
	Осень Autumn	87	324,3	14,3	581,2
Свида шелковистая Svida silky	Весна Spring	65,2	184,7	15,3	34,7
	Лето Summer	43,3	167	16,7	56,3
	Осень Autumn	41,7	251	19,7	44,7
Кизильник Даммера Dummer’s Dogwood	Весна Spring	45,3	255	17,7	62,7
	Лето Summer	40,2	215,7	12,3	48,5
	Осень Autumn	28,1	259,7	16,3	41,3

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Виды растений Types of plants	Период исследования Study period	Химические элементы, мкг/г Chemical elements, mcg/g			
		Mn	Fe	Cu	Zn
Лилейник гибридный Hybrid daylily Лилейник гибридный Hybrid daylily	Весна Spring	60,4	466,7	24	54
	Лето Summer	63	433,7	40,5	63,7
	Осень Autumn	63	586	20	51,7
Шиповник морщинистый Rosehip wrinkly	Весна Spring	57,7	203,7	9,3	28,5
	Лето Summer	38,7	135	6,2	40,5
	Осень Autumn	51,3	264,3	7,5	25,7
Ива белая White willow Очиток видный Sedum	Весна Spring	58,7	746,3	24,7	56,3
	Лето Summer	54,7	596,7	23,1	54
	Осень Autumn	48,3	432	17,2	43,6
Ива белая White willow Очиток видный Sedum	Весна Spring	52	213	15,9	304,2
	Лето Summer	40,4	209,7	12,7	225,7
	Осень Autumn	29,3	196,3	10,1	122,3
Ива белая White willow	Весна Spring	84	237	22,3	66,7
	Лето Summer	84	245,7	21	57
	Осень Autumn	78,7	239,3	19,7	43,5

У *B. nana* обнаружено значительное накопление марганца, достигающее летом 99,3 мкг/г, затем снижающееся до 87,0 мкг/г осенью. У других видов, включая *S. spectabile*, отмечается заметное сезонное снижение содержания марганца: уровень у *S. spectabile* уменьшился с 52,0 мкг/г весной до 29,3 мкг/г осенью, что свидетельствует о снижении его концентрации в течение сезона.

S. alba демонстрирует наивысшие уровни содержания железа, достигая пика весной (746,3 мкг/г) и постепенно снижаясь до 432,0 мкг/г осенью.

H. x hybrida демонстрировала значительное накопление железа, особенно заметное осенью, когда его содержание достигало 586,0 мкг/г. Это свидетельствует о повышенном уровне железа в организме в более поздние сезоны. В отличие от этого, у *R. rugosa* содержание железа оставалось стабильно ниже, с самым высоким значением 264,3 мкг/г осенью. Это относительно низкий показатель по сравнению с другими видами, указывающий на ограниченную способность к накоплению железа.

Содержание меди у всех видов, как правило, было ниже, чем марганца и железа, но все же наблюдались заметные сезонные тенденции.

H. x hybrida продемонстрировала самые высокие уровни меди, особенно летом (40,5 мкг/г), что свидетельствует о пиковом содержании меди в этот сезон. Другие виды, такие как *B. pendula* и *C. dammeri*, показали более стабильные уровни меди в течение сезонов. Например, содержание меди у *B. nana* составляло около 20 мкг/г весной и 14,3 мкг/г осенью. У *R. rugosa* наблюдались самые низкие уровни содержания меди, достигая максимума весной на уровне 9,3 мкг/г и снижаясь до 7,5 мкг/г осенью, что указывает на минимальные сезонные колебания в накоплении меди.

Уровни цинка в различных видах растений различались как между видами, так и в зависимости от сезона. Например, *B. nana* и *S. spectabile* выделялись высокой концентрацией цинка. У *B. nana* максимальное содержание цинка достигало 721,7 мкг/г летом, в то время как у *S. spectabile* пиковое значение было зарегистрировано весной (304,2 мкг/г),

а затем уменьшилось до 122,3 мкг/г осенью, что составляет примерно 60 % от максимального уровня. Наоборот, уровни цинка у другого вида, такого как *C. sericea*, оставались стабильно низкими в течение всего сезона, достигая лишь 56,3 мкг/г летом.

Исследование показывает различия между видами растений на «зеленой» крыше в удержании ТЧ и влияние загрязнения воздуха на способность растений удерживать ТМ. Растения *S. spectabile* и *S. japonica* имеют высокую способность удерживать металлы и могут использоваться на крышах для снижения загрязнения воздуха в городах.

Плотная листва растений *S. spectabile* и *S. japonica* играет ключевую роль в их эффективности захвата твердых частиц благодаря увеличению поверхности и удерживающей способности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование подтверждает важность выбора растений с особыми структурными особенностями для зеленой городской инфраструктуры. Высокие уровни ТМ на «зеленых» крышах, обнаруженные летом, связаны с условиями окружающей среды и активностью промышленности.

Сезонные факторы влияют на содержание ТЧ в растениях. Осадки весной смывают частицы с листьев, летом садоводческие работы улавливают и повышают уровень ТЧ. Осенью старение листьев уменьшает доступную поверхность. Некоторые растения демонстрируют пиковое содержание ТЧ летом из-за структурных адаптаций.

Факторы окружающей среды, такие как осадки и ветер, влияют на растения. Ряд растений не соответствовали ожидаемым закономерностям из-за их видоспецифических особенностей. Внутренние особенности растений могут быть важнее внешних факторов, таких как осадки или садоводческая деятельность.

Исследование подчеркивает важность изучения удержания тяжелых металлов частицами разного размера. Крупные частицы склонны скапливаться на листьях из-за гравитационного осаждения, в то время как мелкие частицы задерживаются в воздухе дольше и оседают позже.

Редкое выпадение осадков уменьшает накопление веществ и влияет на выбор растений для очистки воздуха в городах. Морфология листьев важна для удержания загрязнений.

Результаты демонстрируют, что текстура растений важна для увеличения улавливания частиц PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$. Микроструктура поверхности растений способствует прилипанию частиц и повышает эффективность улавливания ТЧ.

Актуальность взаимосвязи между фенологией растений и удержанием ТЧ в атмосфере подчеркивается сезонными изменениями [20]. Растения вегетационного периода претерпевают изменения, способствующие задержке частиц, что подтверждено

исследованием на примере *B. nana* с увеличением накопления PM_{10-100} на 510 % с весны до лета.

Результаты показывают, что сезонная динамика роста важна для эффективной фиторемедиации. Некоторые растения теряют способность задерживать ТМ осенью из-за уменьшения листовой площади, снижения активности и старения. Однако некоторые виды, например *S. spectabile*, остаются эффективными до осени.

Растения устойчивы к загрязнениям благодаря своей активности и адаптивности. Большая роль в поддержании городской растительности отводится вечнозеленым видам. Размер частиц и время влияют на удержание загрязнений.

Озеленение крыш требует тщательного подбора растений для очистки воздуха в городских условиях. Внедрение растений, сохраняющих свои свойства круглый год, повысит эффективность городской зеленой инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование выявило, что «зеленые» крыши могут способствовать улучшению качества городского воздуха за счет удержания ТМ на поверхности растений. Проведенный анализ удержания ТМ и токсичных веществ в восьми видах растений подчеркнул важную роль видоспецифических характеристик, таких как насыщенная воском поверхность и густая листва, в поглощении загрязняющих веществ. Особенно выделяются виды *S. spectabile* и *S. japonica*, которые проявили исключительную способность удерживать ТМ, делая их идеальными кандидатами для использования на «зеленых» крышах.

Выбор растений для озеленения крыш является ключевым моментом. Следует помнить, что сезонные изменения в удержании тепла и влаги на крыше зависят не только от адаптивных свойств растений, но также от внешних факторов, включая осадки, садоводческую деятельность и опадение листьев. Отклонения, выявленные у растений, таких как *Betula nana* и *Sedum spectabile*, подчеркивают необходимость дальнейших исследований специфической адаптации растений, способствующих устойчивому удержанию тепла и влаги на крыше вне зависимости от сезонных проблем. «Зеленые» крыши, засаженные как вечнозелеными, так и лиственными растениями, могут быть эффективным решением для улучшения микроклимата и экологии городской среды.

Растения на «зеленых» крышах могут смягчить сезонные изменения, обеспечивая постоянное снижение уровня загрязняющих веществ в городах. Растения, покрытые воском, способны задерживать мелкие частицы, что усиливает их способность очищать воздух от загрязнений. «Зеленые» крыши выполняют не только функцию улучшения качества воздуха, но также помогают сокращать «острова тепла» в городах, регулируют стоки воды во время

дождей и представляют собой multifunctional-ные системы.

Для поддержания биоразнообразия требуется провести дальнейшие исследования, направленные на изучение долгосрочного воздействия разных видов растений в различных условиях окружающей среды. Особое внимание следует уделить оптимиза-

ции сочетаний видов для достижения максимальной эффективности. Расширение использования «зеленых» крыш с подбором подходящих растений может способствовать улучшению окружающей среды и здоровья населения, подчеркивая их важность как неотъемлемой части системы экологической безопасности городских территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оводков М.В., Манжилевская С.Е., Бурлаченко А.О., Азаров В.Н. Учет загрязнения воздуха от точечного строительства в сводных расчетах загрязнения атмосферного воздуха // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. № 3 (96). С. 166–174. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_166. EDN URXHKV.

2. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter // Building and Environment. 2021. Vol. 204. P. 108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120. EDN NDXWSC.

3. Hrechko A.A. Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure // Вісник Харківського Національного Університету ім. В.Н. Каразіна. Серія: Екологія. 2022. № 26. Рр. 32–42. DOI: 10.26565/1992-4259-2022-26-03. EDN XRFPWQ.

4. Фролов А.М., Елисеєва Д.Ю., Симонов В.Л. Исследование проблемы загрязнения атмосферы и разработка системы мониторинга атмосферного воздуха // Аллея науки. 2019. Т. 1. № 4 (31). С. 890–901. EDN OAOOBY.

5. Осетрина Д.А., Савельева Ю.К. Применение технологий зеленых крыш в архитектуре // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 8. С. 1053–1058. EDN PADPJP.

6. Михайлова Л.А., Томских Э.С., Лана С.Э., Бурлака Н.М., Смолянинова М.А. Анализ уровня загрязнения атмосферного воздуха городской среды (на примере г. Чита) // Вестник Авиценны. 2020. Т. 22. № 2. С. 228–236. DOI: 10.25005/2074-0581-2020-22-2-228-236. EDN XQPJSM.

7. Meredova G., Atayeva B., Chosurova J., Anageldiveva M. Ecology and architecture: a symbiotic relationship // Innovation Science. 2024. No. 9–1. Рр. 133–135. EDN CGSQDU.

8. Abdalla E.M.H., Alfredsen K., Muthanna T.M. On the use of multi-objective optimization for multi-site calibration of extensive green roofs // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 326. P. 116716. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116716. EDN ZRGSFA.

9. Любин Е.Д. Зеленая архитектура в условиях плотной застройки: анализ подходов в Москве и ев-

ропейских городах // World science: problems and innovations : сб. ст. LXXXIII Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 304–309. EDN HTAKKU.

10. Тимофеева С.С., Ульрих Д.В., Тимофеев С.С. Возможности использования фиторемедиционного потенциала и сорбционно-габионных модулей в ревитализации техногенно-нарушенных территорий Южного Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S6. С. 17–41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-17-41. EDN SBRWKB.

11. Ташекова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 114–124. EDN YTAOEX.

12. Новикова С.А., Кочуров Б.И. Геоэкологическая оценка влияния метеорологических условий на загрязнение воздуха Иркутска // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 3. С. 34–41. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-3-34-41. EDN FBHOJL.

13. Navari-Izzo F., Quartacci M.C. Phytoremediation of metals // Minerva Siotech. 2001. Vol. 13. Рр. 73–83.

14. Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Фиторемедиационный потенциал озелененных территорий в городе // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 685–712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712. EDN CDNGFF.

15. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil // Chemistry Central Journal. 2012. Vol. 6. Issue S2. DOI: 10.1186/1752-153X-6-S2-S6

16. Князева Е.И. Газоустойчивость растений в связи с их систематическим положением и морфолого-анатомическими особенностями // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые ассортименты. М., 1950. 321 с.

17. Олива Т.В., Колесниченко Е.Ю., Панин С.И., Манохина Л.А. Аккумуляция тяжелых металлов древесными породами и сельскохозяйственными культурами в условиях примагистральной экосистемы // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 184–193. DOI: 10.17513/use.37757. EDN QDNBMQ.

18. Сотников И.Л., Петренко А.П. Древесные породы как биоиндикаторы загрязненности чернозема оподзоленного Липецкой области свинцом // Агропромышленные технологии Центральной России. 2025. № 2 (36). С. 151–157. DOI: 10.24888/2541-7835-2025-36-2-151-157. EDN JFANRC.

19. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-

Петербурга // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 5–2. С. 299–305. EDN TVPEAF.

20. Серова Л.А., Петрова Н.А., Куликова Л.В., Шакина Т.Н., Лоскутова Е.А. Фенологические наблюдения в Учебно-научном центре «Ботанический сад» СГУ (фиксация наблюдений и обработка результатов) // Hortus Botanicus. 2021. Vol. 16. Pp. 282–289. DOI: 10.15393/j4.art.2021.7765. EDN DXRUJV.

Поступила в редакцию 29 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 12 ноября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерий Николаевич Азаров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; azarovpubl@mail.ru;

Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SysoevaEV@mgsu.ru;

Дена Карим-Султанович Батаев — доктор технических наук, профессор, директор, академик Академии наук Чеченской Республики; **Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН)**; 364020, г. Грозный, ул. Вахи Алиева, д. 21а; kniiran@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ovodkov M.V., Manzhilevskaya S.E., Burlachenko A.O., Azarov V.N. Inclusion of data on air pollution by dust particles from spot construction in summary calculations of atmospheric air pollution. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. *The Construction and Architecture*. 2024; 3(96):166-174. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_166. EDN URXHKV. (rus.).

2. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*. 2021; 204:108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120. EDN NDXWSC.

3. Hrechko A.A. Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure. Bulletin of the Kharkiv National University V.N. Karazin. *Series: Ecology*. 2022; 26:32-42. DOI: 10.26565/1992-4259-2022-26-03. EDN XRFPWQ.

4. Frolov A.M., Eliseeva D.Yu., Simonov V.L. Research on the Problem of Atmospheric Pollution and Development of an Atmospheric Air Monitoring System. *Alley of Science*. 2019; 1(4):(31):890-901. EDN OAOOBY. (rus.).

5. Osetrina D.A., Savelyeva Yu.K. Application of Green Roof Technologies in Architecture. *Issues of Sustainable Development of Society*. 2022; 8:1053-1058. EDN PADPJP. (rus.).

6. Mikhaylova L.A., Tomskikh E.S., Lapa S.E., Burlaka N.M., Smolyaninova M.A. Analysis of the level of atmospheric air pollution of urban environment (on the example of Chita city). *Avicenna Bulletin*. 2020; 22(2):228-236. DOI: 10.25005/2074-0581-2020-22-2-228-236. EDN XQPJSM. (rus.).

7. Meredova G., Atayeva B., Chosurova J., Annageldiveva M. Ecology and architecture: a symbiotic relationship. *Innovation Science*. 2024; 9-1:133-135. EDN CGSQDU.

8. Abdalla E.M.H., Alfredsen K., Muthanna T.M. On the use of multi-objective optimization for multi-site calibration of extensive green roofs. *Journal of Environmental Management*. 2023; 326:116716. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116716. EDN ZRGSAF.

9. Lyubin E.D. Green architecture in the conditions of dense building: analysis of approaches in Russia and European countries. *World science: problems and innovations : collection of articles of the LXXXIII International Scientific and Practical Conference*. 2025; 304-309. EDN HTAKKU. (rus.).

10. Timofeeva S.S., Ulrikh D.V., Timofeev S.S. Possibilities of using phytoremediation potential and sorption-gabion modules in the revitalization of technogenic-disturbed territories of the southern Urals. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020; S6:17-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-17-41. EDN SBRWKB. (rus.).

11. Tashekova A.Zh., Toropov A.S. Using plant leaves as biogeochemical indicators of urban environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017; 328(5):114-124. EDN YTAOEX. (rus.).

12. Novikova S.A., Kochurov B.I. Geoecological assessment of the impact of meteorological conditions on air pollution in Irkutsk. *Ecology of Urban Areas*. 2023; 3:34-41. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-3-34-41. EDN FBHOJI. (rus.).

13. Navari-Izzo F., Quartacci M.C. Phytoremediation of metals. *Minerva Siotech*. 2001; 13:73-83.

14. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Phytoremediation potential of green spaces in the city. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(5):685-712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712. EDN CDNGFF. (rus.).

15. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*. 2012; 6(S2). DOI: 10.1186/1752-153X-6-S2-S6

16. Knyazeva E.I. Gas resistance of plants in relation to their systematic position and morphological and anatomical features. *Smoke Resistance of Plants and Smoke-Resistant Assortments*. Moscow, 1950; 321. (rus.).

17. Oliva T.V., Kolesnichenko E.Yu., Panin S.I., Manokhina L.A. Heavy metals accumulation by wood species and agricultural plant in conditions of roadside ecosystem. *Advances in Current Natural Sciences*. 2021; 12:184-193. DOI: 10.17513/use.37757. EDN QDNBMQ. (rus.).

18. Sotnikov I.L., Petrenko A.P. Tree species as bioindicators of lead contamination of lead-depleted chernozem in the Lipetsk region. *Agro-industrial Technologies of Central Russia*. 2025; 2(36):151-157. DOI: 10.24888/2541-7835-2025-36-2-151-157. EDN JFANRC. (rus.).

19. Kryukova S.V., Simakina T.E. Assessment of the Influence of Meteorological Parameters on the Concentrations of Pollutants in the Atmosphere of Saint Petersburg. *Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2015; 5-2:299-305. EDN TVPEAF. (rus.).

20. Serova L.A., Petrova N.A., Kulikova L.V., Shakina T.N., Loskutova E.A. Phenological observations at the SSU botanical garden education and research center (recording of observations and processing of results). *Hortus Botanicus*. 2021; 16:282-289. DOI: 10.15393/j4.art.2021.7765. EDN DXRUJV. (rus.).

Received September 29, 2025.

Adopted in revised form on October 8, 2025.

Approved for publication on November 12, 2025.

BIONOTES: **Valery N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Management, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru;

Elena V. Sysoeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SysoevaEV@mgsu.ru;

Dena K.-S. Bataev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic; **Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CI RAS)**; 21a Vahi Aliyev st., Grozny, 364020, Russian Federation; kniiran@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05:658.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.107-121

Совместное применение пакетно-узлового метода и технологий искусственного интеллекта в календарно-сетевом планировании строительных проектов

Людмила Анатольевна Опарина¹, Евгений Александрович Барзыгин¹,
Валерий Альбертович Огурцов¹, Роман Сергеевич Карась²

¹Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия;

²Газстройпром; г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проведении ряда экспериментов по сжатию расписания календарно-сетевого графика проекта строительства выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что использование методологии пакетно-узлового метода (ПУМ) позволяет сокращать плановые сроки строительства на 25 % без изменения длительности выполняемых операций и назначения дополнительных ресурсов. Данный подход, с одной стороны, решает задачу сжатия расписания, с другой — создает дополнительные проблемы или задачи, связанные с увеличением информационных потоков и объемов планирования. Цель исследования — сокращение сроков выполнения строительно-монтажных работ через детализированное планирование и качественную реализацию проекта по сценарию, обозначенному как сценарий ИИ.

Материалы и методы. В качестве исходной методологии календарно-сетевого планирования принята процессная модель Planning & Scheduling. Рассматриваются разные сценарии планирования и реализации строительного проекта: в одном данные со степенью детализации, возрастающей по мере поступления, в другом используется ПУМ строительства.

Результаты. Подтверждена актуальность интеграции машинного обучения (ML) и искусственного интеллекта (AI) в строительную индустрию. Это направление представляет значительный научный и практический интерес, открывая новые горизонты для повышения производительности, безопасности и качества строительных проектов. Проведен анализ технологий нейросетей для решения задач управления сроками и других задач календарно-сетевого планирования. Итоговым решением исследовательской задачи стала инициация проекта «Разработка и внедрение системы ИИ-планировщик и ИИ-помощник руководителя проекта».

Выводы. Интеграция ML и AI в строительную индустрию является важным шагом к устойчивому развитию отрасли, что подтверждается результатами проведенного исследования и требует дальнейшего изучения и развития гипотез.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жизненный цикл строительного проекта, многоуровневое планирование, календарно-сетевое планирование, пакетно-узловый метод строительства, риски, управление проектами, строительство, искусственный интеллект, нейросети

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Опарина Л.А., Барзыгин Е.А., Огурцов В.А., Карась Р.С. Совместное применение пакетно-узлового метода и технологий искусственного интеллекта в календарно-сетевом планировании строительных проектов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 107–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.107-121

Автор, ответственный за переписку: Людмила Анатольевна Опарина, L.A.Oparina@gmail.com.

Combined use of the package-node method and artificial intelligence technologies in calendar-network planning of construction projects

Lyudmila A. Oparina¹, Evgenii A. Barzygin¹, Valery A. Ogurtsov¹, Roman S. Karas²

¹Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation;

²Gazstroyprom; Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. During a series of experiments on compressing the schedule of the calendar-network schedule for a construction project, a hypothesis was put forward and confirmed that the use of Advanced Work Packaging (AWP) construction method allows for a 25 % reduction in planned construction time without changing the duration of the operations performed

or allocating additional resources. However, although this approach solves the problem of schedule compression on the one hand, on the other hand, it creates additional problems or tasks related to an increase in information flows and planning volumes. Current achievements in the field of digitalization allow us to put forward a new scientific hypothesis that the problem of high-level detail in planning data can be solved using artificial intelligence technology. The goal of the study is to reduce the time required for construction and installation work through detailed planning and high-quality project implementation according to a scenario referred to as "Scenario – AI". To this end, it is proposed to move the start of detailed planning to the initial stage, known as "Business Planning and Life Cycle Modeling". Achieving this goal involves the use of machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) technologies, which are very relevant in modern construction management.

Materials and methods. The process model Planning & Scheduling was adopted as the initial methodology of calendar-network planning. The study examines different scenarios of planning and implementation of a construction project: one uses data with a level of detail increasing as it is received, and the other scenario uses the Batch-node construction method.

Results. The conducted research and experiments confirmed the relevance of integrating machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) into the construction industry. This area is of significant scientific and practical interest, opening up new horizons for improving the productivity, safety and quality of construction projects. The authors analyzed neural network technologies for solving time management problems and other calendar and network planning problems. The final solution to the research problem was the initiation of the project "Development and implementation of the AI Planner and AI Assistant Project Manager system".

Conclusions. The study concluded that the integration of ML and AI into the construction industry is an important step towards sustainable development of the industry, which is confirmed by the results of the study and requires further study to confirm and develop hypotheses.

KEYWORDS: life cycle of a construction project, multilevel planning, calendar and network planning, batch-node construction method, risks, project management, construction, artificial intelligence, neural networks

FOR CITATION: Oparina L.A., Barzygin E.A., Ogurtsov V.A., Karas R.S. Combined use of the package-node method and artificial intelligence technologies in calendar-network planning of construction projects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):107-121. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.107-121 (rus.).

Corresponding author: Lyudmila A. Oparina, L.A.Oparina@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные подходы к календарному планированию, основанные на методах критического пути (CPM) и PERT, хотя и остаются фундаментом управленческой практики, зачастую недостаточно эффективны в условиях неопределенности и динамических изменений. Статичная природа, низкая адаптивность к оперативным корректировкам и ограниченная способность к прогнозированию отклонений снижают их применимость в современных условиях. В этой связи все большее внимание уделяется внедрению передовых цифровых технологий, в частности — машинного обучения (МО, Machine Learning, ML) и искусственного интеллекта (ИИ, Artificial Intelligence, AI), как инструментов повышения эффективности управления сроками. AI обеспечивает автоматизацию рутинных процессов: интерпретации графической документации, формализации логических связей между работами, проверки соответствия проектных решений нормативным требованиям. Это особенно важно в условиях дефицита высококвалифицированных специалистов в области проектного управления. В условиях, когда цифровизация строительной отрасли закреплена в национальных программах и стратегиях развития («Цифровая экономика», «Стратегия пространственного развития РФ»), исследование вопросов интеграции AI/ML в процессы календарного планирования приобретает научную и практическую актуальность. Перспективные направления дальнейших исследований — разработка отечественных AI-моделей, обученных на российских проектных данных; интеграция с системами электронного документооборота и создание методических рекоменда-

ций по внедрению предиктивной аналитики в практику строительных организаций.

Сегодня существуют успешные примеры внедрения AI в строительную отрасль. Так, платформы Oracle Primavera, Autodesk Construction Cloud и Trimble Connect интегрируют модули предиктивной аналитики, позволяющие прогнозировать вероятность задержек, оценивать влияние изменений в графике и оптимизировать ресурсное обеспечение. В российской практике разработки ведутся в рамках национальных цифровых платформ, таких как KROSS, ЦИФРА, а также в составе BIM-решений, разрабатываемых с учетом требований ГОСТ Р 21.101–2020 и федеральных информационных моделей (ФИМ). Таким образом, применение технологий ИИ и МО является актуальной темой для исследования и предметом данной статьи.

Авторы провели ряд экспериментов по сжатию расписания календарно-сетевого графика (КСГ) проекта строительства, в ходе которых была выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что использование методологии пакетно-узлового метода (ПУМ/AWP) позволяет сокращать плановые сроки строительства на 25 % без изменения длительности выполняемых операций и назначения дополнительных ресурсов. Однако несмотря на то, что этот подход, с одной стороны, решает задачу сжатия расписания, с другой — создает дополнительные проблемы или задачи, связанные с увеличением информационных потоков и объемов планирования. Установлено, что эффект сжатия расписания может быть достигнут с применением так называемого сценария исполнителя, используемого при планировании проекта на стадии, предшествующей проектированию. В свою очередь, логика сценария исполнителя

при разработке КСГ предусматривает увеличение степени проработки проекта на ранних этапах его жизненного цикла (ЖЦ), а следовательно, приводит к увеличению степени детализации КСГ.

Наиболее подходящим для решения подобных задач подходом служит методика многоуровневого календарно- сетевого планирования, позволяющая приступать к формированию графика с минимальным количеством информации, высокой степенью неопределенности и соответственно невысокой точностью и детализировать график по мере поступления новой информации, увеличивая тем самым точность планирования.

При использовании многоуровневого подхода к планированию графика реализации проекта процессы планирования предусматривают регулярную актуализацию плановых данных, производимую при поступлении актуальной исходной информации (проектной и рабочей документации) (рис. 1).

Экспериментально было определено, что увеличение детализации графика в 4 раза дает положительный эффект сжатия расписания, а уменьшение детализации показывает отрицательный наблюдаемый эффект и делает невозможным сокращение длительности проекта с использования методологии ПУМ.

Основной объем детализации плановых данных связан с необходимостью персонализированного ресурсного планирования — определением состава строительных бригад и распределением физических объемов строительно-монтажных работ (СМР) между бригадами, что практически затруднительно реализовать в графике СМР при переносе начала процессов планирования СМР (точка T1) на ранние сроки (точка T2) стадии ЖЦ объекта строительства (рис. 2), в связи с чем выдвинута гипотеза, которая частично была подтверждена серией практических экспериментов, заключавшихся в использовании технологии нейросетей для решения задач календарно-сетевого планирования.

В последние годы технологии нейросетевого прогнозирования, ML и AI активно интегрируются в строительную индустрию, предоставляя новые инструменты для решения сложных задач на всех этапах архитектурного проектирования и управления строительством [1–6]. Эти технологии открывают новые горизонты для инноваций и устойчивого развития в строительной отрасли, что делает их актуальным направлением научных исследований и практического применения [7, 8].

В результате проведенных исследований и экспериментов сделаны выводы относительно актуаль-

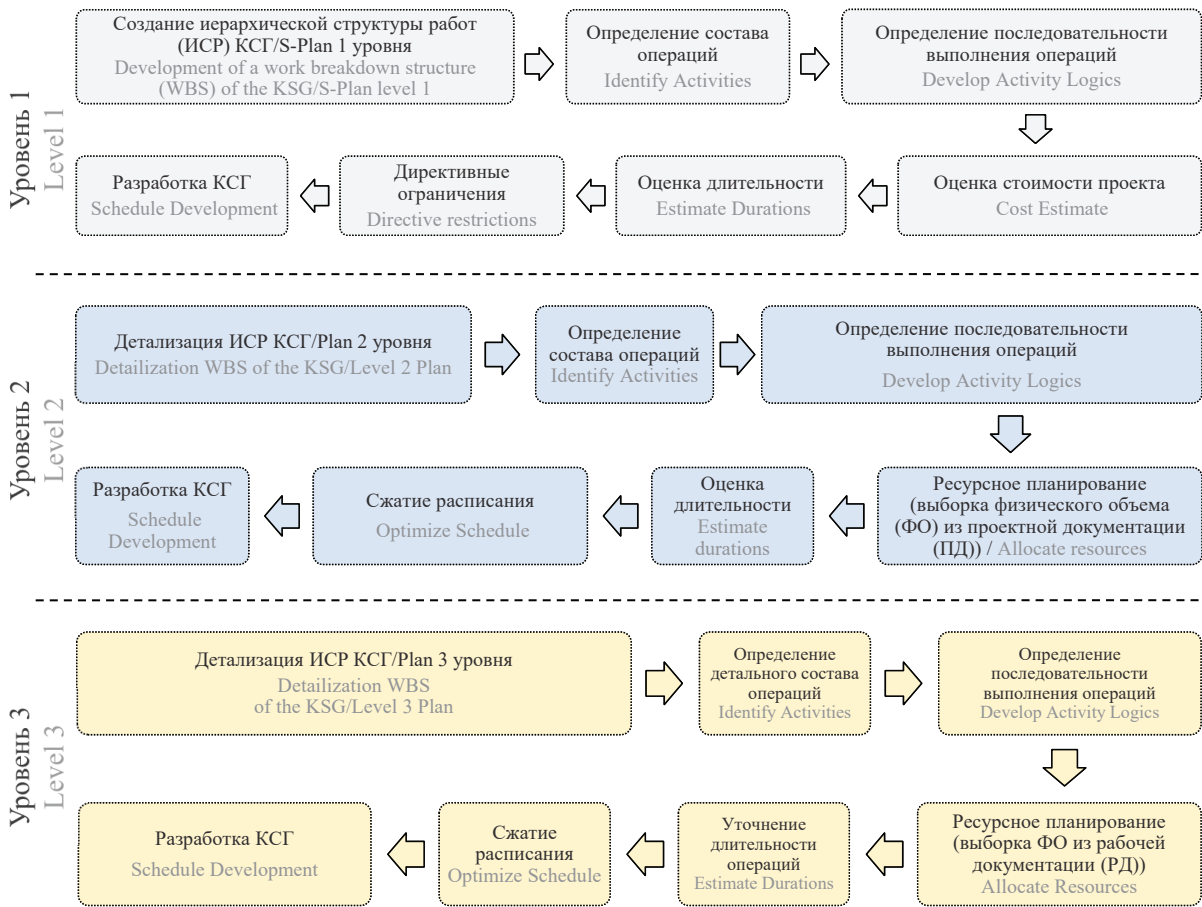


Рис. 1. Последовательность разработки календарно-сетевых графиков разных уровней
Fig. 1. Consistent development of schedule-planes of different levels

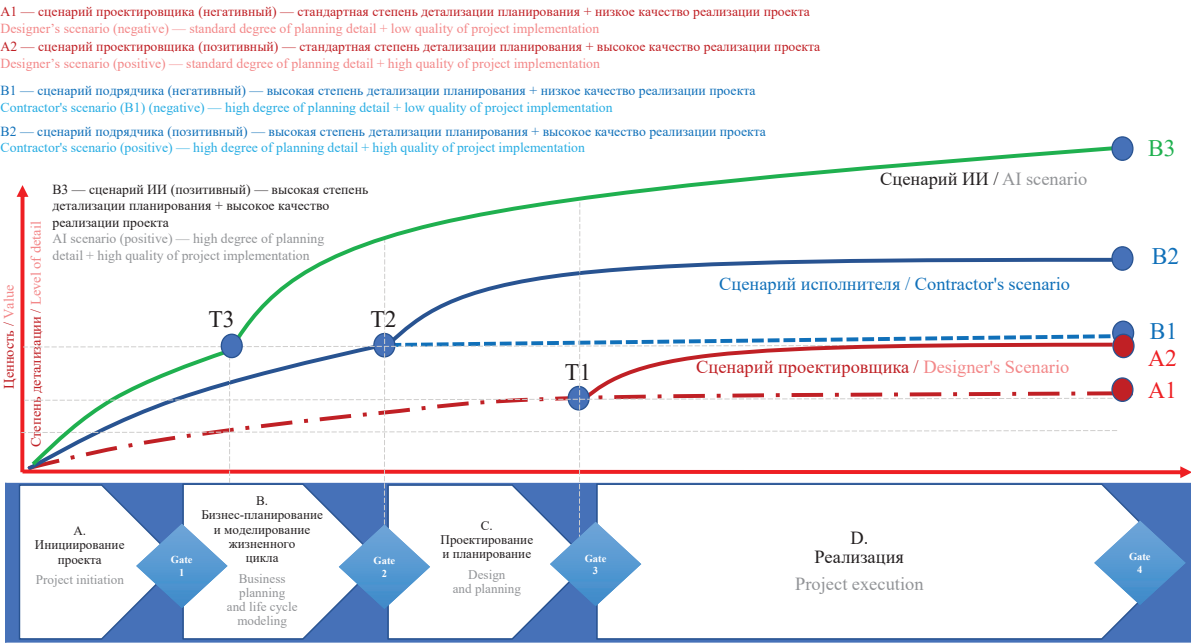


Рис. 2. Диаграмма зависимости величины ценности (value) от качества проработки (степень детализации плана) и реализации проекта

Fig. 2. Diagram of the dependence of Value on the quality of development (degree of plan detail) and implementation of the project

ности и необходимости их дальнейшего продолжения до подтверждения или опровержения гипотезы.

Предметом настоящего исследования определены процессы календарно-сетевое планирования, качество, детализацию и скорость течения которых необходимо увеличить за счет использования технологии ИИ, объектом исследования стали нейросети.

Цель исследования сформирована как достижение сокращения сроков выполнения строительно-монтажных работ за счет высокой степени детализации планирования и высокого качества реализации проекта по сценарию B3, получившим название «Сценарий ИИ», путем переноса сроков начала процессов детального планирования в точку T3, находящуюся в начале стадии B «Бизнес-планирование и моделирование жизненного цикла».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методами планирования строительства, разработкой календарно-сетевых графиков и поиском путей сокращения сроков СМР занимаются многие ученые. С.П. Король и Р.А. Король к календарному планированию и решению оптимизационных задач предложили применять системотехнический подход и в качестве модели календарного плана разрабатывать сетевую модель, создаваемую на алгоритмическом подходе [9]. Авторы С.А. Баркалов, С.И. Моисеев и Е.А. Серебрякова предлагают внедрять динамические модели оценки рисков реализации строительных проектов с использованием аппарата цепей Маркова совместно с методами сетевого планирования и управления в условиях неопределенности [10]. Моделиро-

ванием сроков строительства дискретными цепями Маркова занимаются О.Н. Яркова и Н.А. Сидоренко, которые предложили модель плана строительства, позволяющую определить ряд важных характеристик: вероятность реализации плана строительства в установленные сроки; вероятность того, что объект будет достроен; среднее время строительства до стадии завершения; безусловные вероятности состояний системы через любой заданный промежуток времени [11].

Вопросы планирования графика проекта в условиях неопределенности рассмотрены в литературе довольно подробно. В частности, К.А. Христофорова, В.С. Демидова, Д.Н. Кривогино представили подход, который позволяет в зависимости от степени влияния факторов предсказать возможные пути устранения проблем по невыполнению сроков реализации проектов и рекомендуют к календарным срокам реализации проекта добавить 3 месяца, для того чтобы рационально управлять КСГ строительства в условиях неопределенности [12].

Применение ИИ в строительстве постепенно появляется в трудах специалистов по управлению проектами и ведущих ученых-исследователей. М.В. Петроченко и соавт. предлагают использовать алгоритмы ИИ для работы с классификаторами строительной информации посредством моделей МО и обучающей выборки на основе цифровых информационных моделей гражданских и промышленных объектов [13]. А.В. Гинзбург, А.И. Рыжкова разработали алгоритм создания ИИ в области идентификации и анализа потенциальных рисков событий, что способствует созданию самостоятельной аналитической системы для разных этапов строительного

производства: от эскиза до рабочей документации и проведения работ на строительной площадке [14]. В.И. Теличенко, А.А. Лапидус, М.Ю. Слесарев предлагают использовать ИИ в креативном синтезе экологически ориентированных перспективных образов прорывных технологий с учетом статистической обработки патентной информации и фондов технических регламентов [15]. Л.А. Сулейманова и соавт. провели исследование, ориентированное на разработку метода нейросетевого прогнозирования теплопотерь как элемента системы управления ЖЦ объектов капитального строительства [2]. В работе А.Б. Петрухина выявлены приоритетные направления внедрения ИИ-технологий в строительном комплексе РФ: искусственный интеллект в автоматизированном проектировании и управлении строительством, контроле качества строительных работ, прогнозировании рисков в строительстве, анализе данных, оптимизации ресурсов, обеспечении безопасности и экологической устойчивости [16].

Однако публикации, посвященные вопросам управления сроками строительно-монтажных работ и сроками реализации строительных проектов с использованием ИИ, практически отсутствуют. Между тем технологии ИИ обладают огромным потенциалом и возможностями для решения этой актуальной задачи.

Для реализации поставленной цели исследования, которая состоит из ряда задач по созданию КСГ 3-го уровня на начальной стадии ЖЦ объекта строительства, были проанализированы процессы

календарно-сетевого планирования на предмет возможности использования ИИ.

В качестве исходной методологии календарно-сетевого планирования принята процессная модель Planning & Scheduling, разработанная Международной Ассоциацией развития стоимостного инжиниринга (AACI), как неотъемлемая часть методологии управления проектами, которая, в частности, активно используется в России такими крупными проектно-ориентированными компаниями, как госкорпорация «Росатом» и ПАО «Газпромнефть» (рис. 3).

Выбор процессной модели научно обоснован прежде всего тем, что в ней рассматриваются комплексные процессы планирования ресурсов, сроков и стоимости, которые протекают на всех стадиях ЖЦ объекта строительства (рис. 4).

В результате анализа процессной модели рассмотрены два варианта: вариант 1 с учетом всех процессов календарно-сетевого планирования процессной модели Planning & Scheduling, особенностью которой является разделение процессов планирования ресурсов (рис. 5) и доработанный под использование технологии ИИ вариант 2, учитывающий все процессы календарно-сетевого планирования модели Planning & Scheduling и приоритет потребности в ресурсах, особенность которой заключается в интеграции процессов планирования ресурсов (рис. 6).

Для создания архитектуры исследовательской модели — практической составляющей продукта рассмотрена структура системы управления проектами Единая информационная цифровая среда,

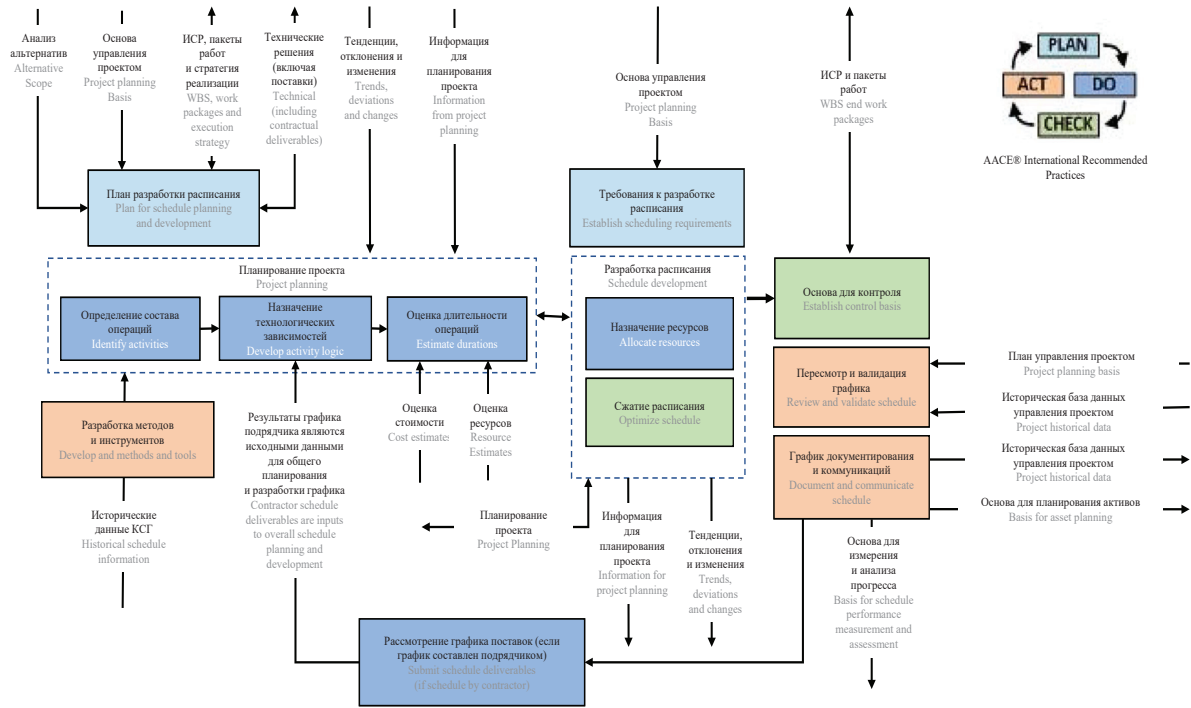


Рис. 3. Процессная модель календарно-сетевого планирования Planning & Scheduling

Fig. 3. Process model Planning & Scheduling

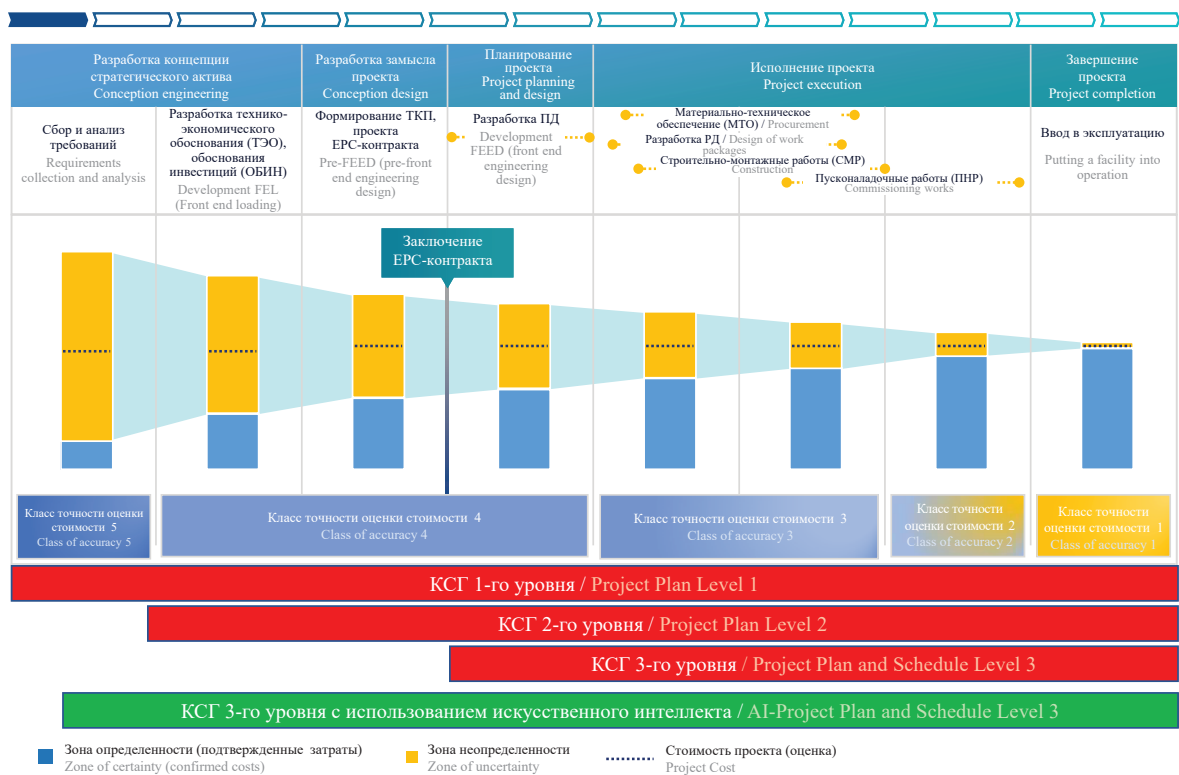


Рис. 4. Классы точности оценки стоимости и уровни КСГ
Fig. 4. Cost estimation accuracy classes and planning levels

разработанная ООО «Стройгазконсалтинг», и применяемый в АО «Газстройпром» программный продукт КРОСС, являющийся частью Единой цифровой платформы (ЕЦП), который был взят в качестве основы для использования алгоритмов ИИ (рис. 7).

Приведенная архитектура представляет собой межфункциональную, многоуровневую систему

управления строительным проектом, ориентированную на интеграцию планирования, учета и контроля в рамках ЖЦ строительства. Основной целью является формирование и динамическое поддержание интегрированного календарно-сетового графика (ИКСГ) — ключевого инструмента управления сроками, ресурсами и стоимостью проекта. Архитектура реализуется в среде двух взаимодействующих ин-

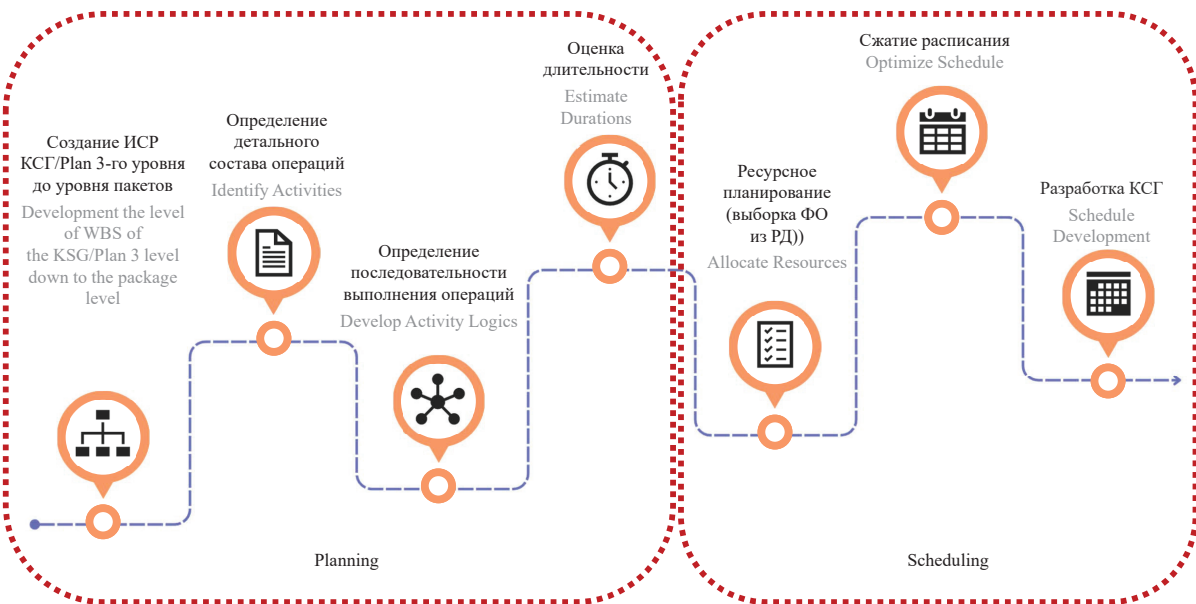


Рис. 5. Последовательность разработки графика проекта вариант 1 с учетом процессной модели Planning & Scheduling
Fig. 5. Process of Project Schedule Development variant 1 based the process model Planning & Scheduling

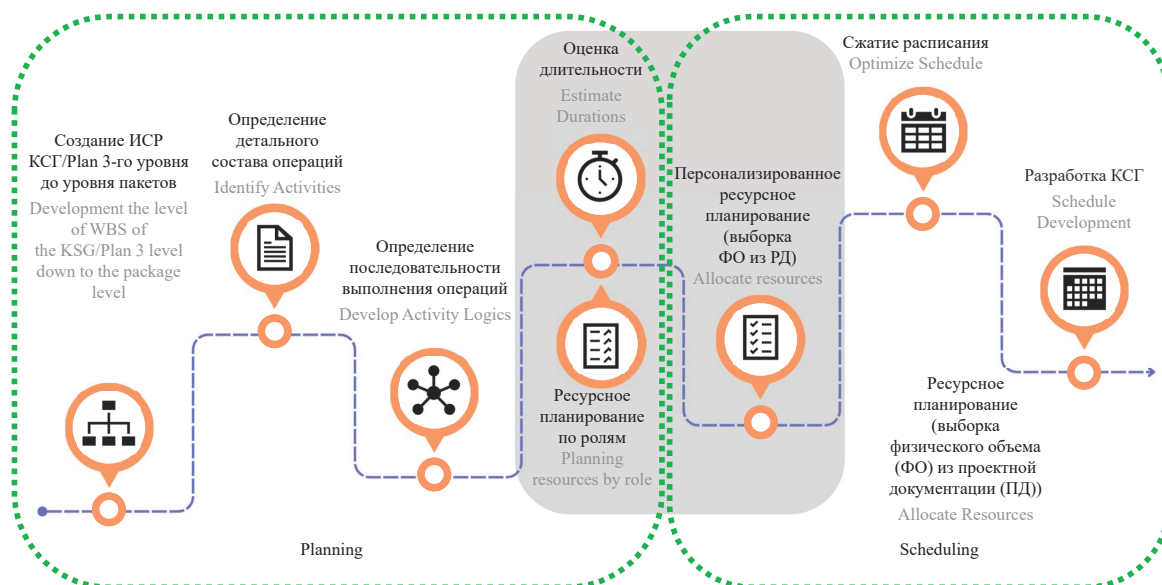


Рис. 6. Последовательность разработки графика проекта вариант 2 с учетом процессной модели Planning & Scheduling

Fig. 6. Process of Project Schedule Development variant 2 based the process model Planning & Scheduling and prioritizing resource planning by role

формационных систем: KROSS (внутренняя система управления) и Primavera EPPM (система управления проектами на уровне предприятия). Это обеспечивает двухуровневое управление: оперативно-тактическое (KROSS) и стратегическое/координационное (Primavera). На схеме (рис. 7) показаны следующие функциональные блоки и их взаимодействие:

- блок «Подготовка данных» (Data origination).

На данном этапе происходит инициализация проектных сведений: загрузка отчетной документации — импорт исходной информации данных о затратах, необходимых для построения базового графика; задание лимитированных затрат — установка бюджетных ограничений, служащих границей для дальнейшего планирования; создание ландшафта строительства (набора объектов) — формирование иерархической структуры работ, соответствующей физическим или функциональным элементам проекта; ввод остатков незавершенного строительства — актуализация состояния проекта на момент начала планирования, что позволяет избежать дублирования или пропуска работ. Этот блок реализует принцип «единого источника правды» (Single Source of Truth), где все входные данные стандартизированы и верифицированы перед передачей в планирующие модули;

- блок «Планирование» (Planning). Центральный узел архитектуры — построение ИКСГ. Реализует перевод сметного поля в текущий уровень цен — корректировка бюджетных показателей с учетом инфляции, рыночных изменений и замены ресурсов. Это обеспечивает реалистичность плановых показателей. Построение ИКСГ — генерация сетевой модели с учетом технологических связей между работами, ресурсных ограничений, временных рамок и критического пути. При этом используется методология

CPM (Critical Path Method) и Resource-Constrained Scheduling (RCS). ИКСГ выступает как динамическая модель, отражающая не только временные, но и ресурсные зависимости. При планировании работ (Work planning) осуществляется автоматизация распределения задач и формирование диаграмм Ганта в Primavera EPPM, что обеспечивает визуализацию и координацию между участниками проекта;

- блок «Учет выполнения» (Performance accounting). Обеспечивает обратную связь между планом и фактом: формирование обменных форм для субподрядчиков — стандартизированные шаблоны для получения данных о ходе выполнения работ; ввод текущего выполнения (оперативный учет) — внесение фактических данных о завершенных объемах, затратах и ресурсах; подготовка актов КС-2 — оформление первичных документов, подтверждающих выполнение работ для заказчика; загрузка утвержденных актов КС-2 — включение официально согласованных сведений в систему учета; формирование первичных документов — создание внутренних учетных записей на основе актов. При этом реализуется принцип «замкнутого контура управления» (Closed-loop control), где данные о фактическом исполнении применяются для корректировки плана и анализа отклонений;

- блок «Мониторинг и контроль» (Control & Monitoring). Направлен на аналитическую оценку эффективности: анализ хода реализации строительства — сравнение плановых и фактических показателей по срокам, стоимости и ресурсам; формирование аналитических отчетов в разных разрезах — многомерный анализ (по объектам, подрядчикам, периодам, типам работ); ведомости сметной стоимости, выборки ресурсов, прочие отчеты — детализированные вы-

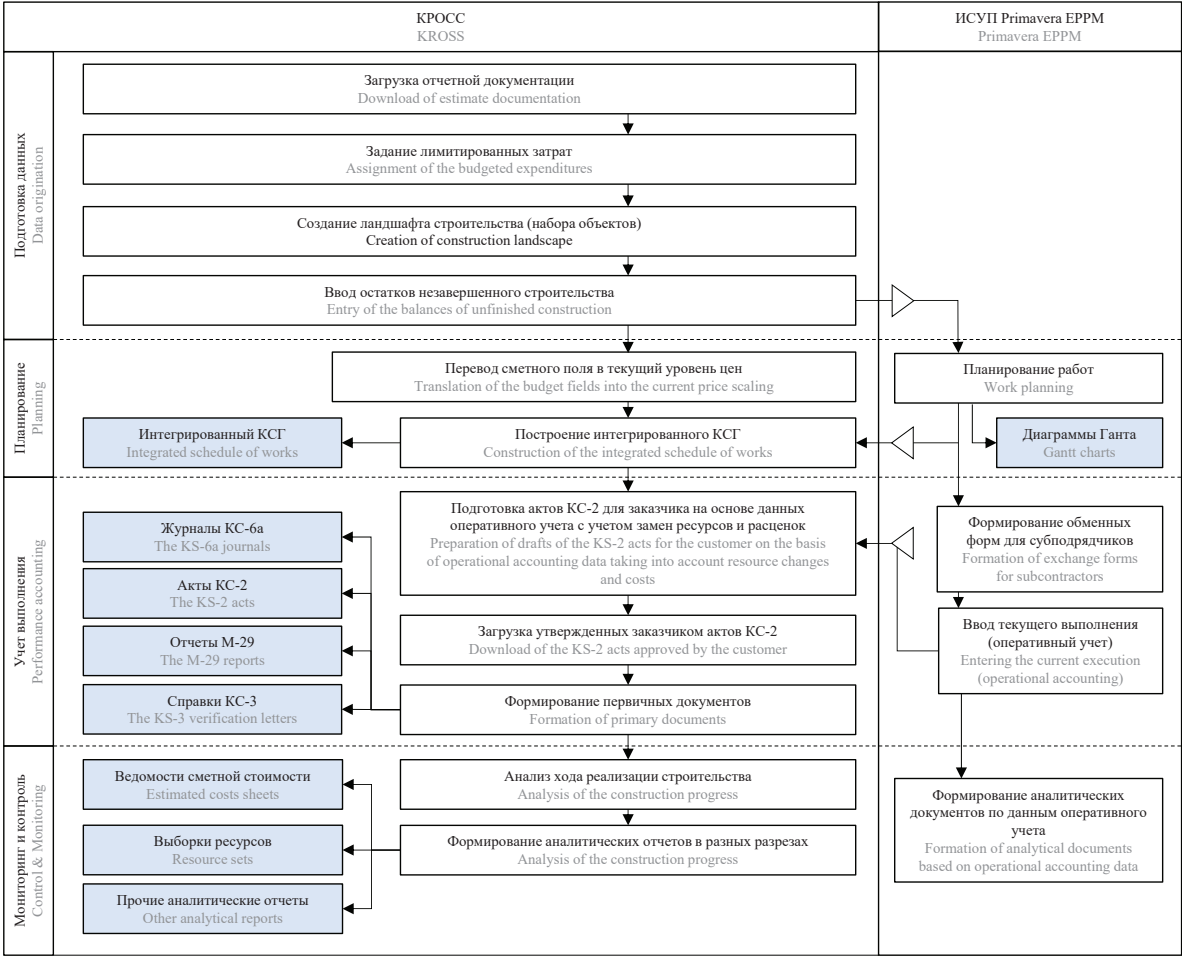


Рис. 7. Календарный анализ реализации строительства. Архитектура бизнес-процесса формирования интегрированно-го календарно-сетевых графика

Fig. 7. Calendar analysis of the implementation of construction. Business process architecture

ходные данные для принятия управленческих решений. При этом применяется методология Earned Value Management (EVM) — комплексный подход к оценке прогресса проекта через три ключевых показателя: Planned Value (PV), Earned Value (EV), Actual Cost (AC). Также используется методология ABC-анализа для приоритизации зон риска и отклонений.

Такая архитектура бизнес-процесса формирования ИКСГ обеспечивает интеграцию финансово-экономических, временных и ресурсных параметров в единой модели, поддерживает принятие решений на основе данных (Data-Driven Decision Making) и позволяет оперативно реагировать на изменения в ходе реализации проекта за счет обратной связи и анализа отклонений. Схема соответствует современным стандартам управления проектами: PMBOK, ISO 21500, PRINCE2, а также требованиям цифровой трансформации в строительстве (BIM, Digital Twin). Описанная архитектура представляет собой высокоинтегрированную систему управления строительными проектами, основанную на принципах системного подхода, обратной связи и аналитики. Она обеспечивает точность планирования, прозрачность учета и эффективность

контроля, что критически важно для успешной реализации сложных строительных проектов в условиях ограниченных ресурсов и высокой неопределенности.

Для практического использования технологий ИИ в исследовательской модели были проанализированы и протестированы существующие решения [17–29]. Результаты анализа представлены в таблице.

Эффективное использование нейросетей предусматривает организацию работы с большими данными (Big Data) для манипулирования сведениями в формате таблиц, включая фильтрацию, агрегацию и преобразование данных путем их извлечения из Excel и MS SQL Server с последующей обработкой для создания нестандартных таблиц, сложных вычислений и аналитических выражений для формирования отчетов и визуализаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Итоговым решением исследовательской задачи стала инициация проекта «Разработка и внедрение системы ИИ-планировщик и ИИ-помощник руководителя проекта (РП)», включающего три последова-

Анализ и выбор технологий нейросетей для решения задач календарно- сетевого планирования

Analysis and selection of neural network technologies for solving calendar-network planning problems

Наименование технологии нейросетей Name of neural network technology	Описание использования Description of use
2	3
Сверточные нейронные сети CNN (от англ. Convolutional Neural Networks). Например, Tesseract OCR, которая используется для распознавания текста на изображениях Convolutional Neural Networks (CNN). For example, Tesseract OCR, which is used to recognize text in images	Планируется использовать для обработки изображений и задач распознавания информации из проектной документации, рабочей документации и других документов в формате PDF или изображений, а также данных КСГ, в том числе исторических It is planned to be used for image processing and information recognition tasks from design documentation, working documentation and other documents in PDF or image format, as well as CSG data, including historical ones
Технология нейросетей долгосрочной – краткосрочной памяти LSTM (от англ. Long Short-Term Memory) — разновидность рекуррентных нейронных сетей RNN (от англ. Recurrent Neural Networks) Long Short – Term Memory (LSTM) neural network technology is a type of recurrent neural networks (RNN)	Использование технологии ИИ для решения задач с сохранением контекста и памяти о предыдущих входах и запросов для предсказания следующего слова в предложении и анализа временных рядов Using AI technology to solve problems with context and memory of previous inputs and queries for predicting the next word in a sentence and analyzing time series
Технология нейросетей-трансформеров (от англ. Transformers), включая генеративные технологии, такие как BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), модель, разработанная компанией Google, которая использует двунаправленные контекстуальные представления для обработки текста и GPT (от англ. Generative Pre-trained Transformer). Модель, разработанная компанией OpenAI, применяет трансформеры для генерации текста и предварительно обучается на больших объемах данных. А также аналогичные решения: LLAMA, DeepSeek, Qwen, MashaGPT, YandexGPT 5 Pro, GigaChat, Grok Transformer neural network technology, including generative technologies such as BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), a model developed by Google that uses bidirectional contextual representations to process text, and GPT (Generative Pre-trained Transformer), a model developed by OpenAI that uses transformers to generate text and is pre-trained on large amounts of data. And similar solutions: LLAMA, DeepSeek, Qwen, MashaGPT, YandexGPT 5 Pro, GigaChat, Grok	Планируется использовать для: • понимания контекста и решения задач обработки естественного языка, включая понимание контекста и семантики текста, что критично для анализа сложной проектной документации и контрактов; • поиска информации и обучения на задачах поиска информации, извлекая ключевые данные из больших объемов текста; • для автоматической генерации отчетов по проектам. Предпочтение отдается решениям с Open Source (открытое программное обеспечение) It is planned to be used for: • understanding the context and solving natural language processing problems, including understanding the context and semantics of text, which is critical for analyzing complex project documentation and contracts; • information retrieval and training on information retrieval tasks, extracting key data from large volumes of text; • for automatic generation of project reports. Preference is given to Open Source solutions (open source software)
Технология рекомендательных нейросетей (аналогичных решению Amazon Personalize) — системы рекомендаций на основе коллаборативной фильтрации и контентного анализа Neural network recommendation technology (similar to Amazon Personalize) — recommendation systems based on collaborative filtering and content analysis	Планируется использовать для: • персонализированного поиска с использованием системы рекомендаций для анализа поведения пользователя (например, какие документы он чаще всего запрашивает) и предложения наиболее релевантных материалов; • анализ исторической информации о проектах, выявляя паттерны и тенденции, для помощи в принятии решений Planned use for: • personalized search using a recommendation system to analyze user behavior (e.g. what documents they most often request) and suggest the most relevant materials; • analysis of historical information about projects, identifying patterns and trends, to help in decision making

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 1, 2026

Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 1, 2026

Окончание табл. / End of the Table

Наименование технологии нейросетей Name of neural network technology	Описание использования Description of use
2	3
Технология нейросетей — генеративные модели, такие как GAN (от англ. Generative Adversarial Networks) или VAE (от англ. Variational Autoencoders) Neural network technology — generative models such as GAN (Generative Adversarial Networks) or VAE (Variational Autoencoders)	Планируется использовать для: • генерации новых табличных данных, которые соответствуют заданным условиям, т.е. создания таблиц по нестандартным запросам; • генерации новых табличных данных на основе существующих данных Excel и MS SQL для создания новых таблиц с учетом статистических свойств исходных данных It is planned to be used for: • generating new tabular data that meet specified conditions, i.e. creating tables based on non-standard queries; • and generating new tabular data based on existing Excel and MS SQL data to create new tables taking into account the statistical properties of the source data
Использование библиотек для анализа данных, таких как Pandas (Python) или DAX (Power BI) Using data analysis libraries such as Pandas (Python) or DAX (Power BI)	Библиотека Pandas позволяет манипулировать данными в формате таблиц, включая фильтрацию, агрегацию и преобразование данных путем извлечения данных из Excel и MS SQL Server, с последующей обработкой для создания нестандартных таблиц. Библиотека DAX (Data Analysis Expressions) используется для работы с Power BI, DAX, которая позволяет создавать сложные вычисления и аналитические выражения для создания отчетов и визуализаций The Pandas library allows you to manipulate data in a table format, including filtering, aggregating and transforming data by extracting data from Excel and MS SQL Server, followed by processing to create custom tables. The DAX (Data Analysis Expressions) library is used to work with Power BI, DAX, which allows you to create complex calculations and analytical expressions to create reports and visualizations

тельных и взаимосвязанных этапа, при этом являющихся самостоятельными продуктами.

Этап 1. Разработка ИИ-помощника РП (версия 1.0) с функциями: запрос – ответ – диалог о методологии управления проектами и календарно-сетевого планирования; запрос и анализ нестандартных таблиц из ЕЦП. В продукте планируется использовать методологические и проектные данные для обучения ИИ из следующих источников данных: корпоративная методология управления проектами АО «Газстройпром»; база данных (БД) документооборота АО «Газстройпром» в части проектных документов; база данных ЕЦП, включая проекты в ИСУП Primavera Р6 и хранилище электронных таблиц в виде Excel-файлов; база данных национальных стандартов в части методологий управления проектами и организации строительства; база данных международных стандартов и методологии управления проектами.

Этап 2. Разработка ИИ-планировщика с функциями: формирование ИСР и пакетов работ на основании ТЗ (техническое задание для ИИ — промпт); создание состава операций по видам работ внутри пакета работ (ИСР); назначение ресурсов на операции пакетов по нормативам; определение и назначе-

ние технологических последовательностей на операции по видам работ; определение длительности операций и длительности проекта, в том числе с учетом директивных сроков графиков заказчика; сжатие календарно-сетевого графика с учетом фактического наличия ресурсов, требований и ограничений (формирование интенсивного графика). Планируется использовать методологические и проектные данные для обучения ИИ из различных источников БД и разработок в области МО. Помимо пяти источников из этапа 1, планируется дополнить: базой данных проектного документооборота Pilot-ICE (проектная и рабочая документация); корпоративными нормативами АО «Газстройпром» в части ресурсного и сметного планирования; базой существующих результатов машинного обучения АО «Газстройпром» и АО «Ленгазспецстрой» в части определения состава операций КСГ и назначения ресурсов на операции; разработкой в области МО по назначению технологических зависимостей между операциями и проектами в файле формата *.xer; разработкой в области МО по формированию ИСР в файле формата *.xer; в области МО по созданию пакетов ИСР в логике AWP в файле формата *.xer; разработкой в области МО по формированию интенсивного графика в файле

формата *.xer; международными и национальными стандартами и методологией КСП (в том числе в области проверки качества графиков).

Этап 3. Update и обучение ИИ-помощника РП для решения проектных задач полного цикла управления проектом (до версии 2.0 с интеграцией этапов 1 и 2 и дальнейшим обучением до версии 3.0).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного исследования выполнен всесторонний анализ существующих методологий календарно- сетевого планирования в контексте их применимости для интеграции с технологиями ИИ. В ходе исследования особое внимание уделено анализу передовых практик планирования, способствующих повышению эффективности управления сроками без увеличения объема ресурсов и без изменения технологической длительности отдельных строительно-монтажных операций. В этом контексте значительный интерес представляет ПУМ, являющийся русскоязычной адаптацией международной методологии Advanced Work Packaging (AWP). Данная методология основана на принципе раннего детального планирования работ по функциональным узлам (объектам, системам, зонам) с четкой привязкой к ресурсному обеспечению, логистике, документации и ответственности исполнителей.

Установлено, что системное внедрение ПУМ/ AWP позволяет достичь сокращения плановой продолжительности реализации инвестиционно-строительного проекта на 20–25 % при сохранении неизменными нормативных трудозатрат и технологических регламентов выполнения отдельных операций. Такой эффект достигается за счет:

- упреждающего формирования полного комплекта условий для начала работ (документация, материалы, квалифицированные бригады, разрешения);
- минимизации простоев и перерывов в производстве благодаря согласованности графиков смежных подрядчиков;
- повышения степени параллельности процессов из-за четкой декомпозиции и интерфейсного управления;
- снижения уровня неопределенности на стадии реализации благодаря высокой детализации плана на уровне исполнения.

Таким образом, ПУМ/AWP рассматривается не как альтернатива традиционному календарному планированию, а как его эволюционное развитие, обеспечивающее переход от формального расписания к управляемому потоку работ с гарантированной готовностью условий. В рамках разрабатываемой ИИ-системы ИИ-планировщик заложена возможность автоматизированной генерации и оптимизации рабочих пакетов в соответствии с принципами ПУМ: алгоритмы ИИ анализируют BIM-модель, выявляют технологические и пространственные зависимости, формируют пакеты работ и проверяют их готовность к исполнению.

Интеграция ПУМ/AWP с технологиями ИИ открывает новые возможности для достижения синергетического эффекта: если методология дает прирост 25 % за счет улучшения организации, то применение ИИ позволяет дополнительно повысить точность прогнозирования, оперативно корректировать пакеты при изменении условий и минимизировать человеческий фактор в управлении. Это делает комбинированный подход перспективным для масштабных, многосубподрядных и высокотехнологичных объектов.

На основании полученных результатов разработана концепция экспериментального внедрения ИИ-решений в практику управления инвестиционно-строительными проектами. В рамках исследовательской инициативы инициирован пилотный проект под условным названием «Разработка и внедрение системы ИИ-планировщик и ИИ-помощник руководителя проекта». Проект ориентирован на создание двухкомпонентной когнитивной системы:

- ИИ-помощник — интерактивный ассистент на базе NLP (Natural Language Processing), предназначенный для поддержки принятия решений, генерации уведомлений о рисках, подготовки аналитических сводок и взаимодействия с участниками проекта через текстовые или голосовые интерфейсы;
- ИИ-планировщик — модуль, осуществляющий автоматическое построение, актуализацию и оптимизацию календарно-сетевых графиков на основе анализа исторических данных, текущего прогресса и внешних факторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Слепушкин Д.В., Бурлов Д.Ю. Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 3. С. 440–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455. EDN MYNCAL.

2. Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х., Рябчевский И.С. Управление жизненным циклом объектов капитального строительства нейросетевым прогнозированием теплопотерь здания. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. 164 с. EDN UYZPHS.

3. Петрухин А.Б., Щербакова Н.А. Развитие технологий искусственного интеллекта в строительстве // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 2. С. 67–77. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.2.67. EDN VJPORE.

4. Газаров А.Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 136–139. EDN DZQOPN.

5. Колчин В.Н. Специфика применения технологий «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JJLECU.

6. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440

7. Караманянц М.Б. Изменения строительной отрасли при активном внедрении технологии с применением искусственного интеллекта (ИИ) // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 141–145. EDN SBRLCQ.

8. Городнова Н.В. Применение искусственного интеллекта и нанотехнологий в инвестиционно-строительной сфере России // Вестник НГУЭУ. 2021. № 3. С. 81–95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR

9. Король С.П., Король Р.А. Алгоритмический подход в сетевом моделировании в строительстве: графические решения и оптимизационные задачи // Жилищные стратегии. 2023. Т. 10. № 3. С. 317–332. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118842. EDN CTTTEW.

10. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Применение Марковских случайных процессов для оценки рисков при реализации строительных проектов // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании : мат. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 99–104. EDN IZUOGT.

11. Яркова О.Н., Сидоренко Н.А. Моделирование сроков строительства дискретными цепями Маркова // Инженерный вестник Дона. 2024. № 2 (110). С. 506–519. EDN QUFHYZ.

12. Христофорова К.А., Демидова В.С., Кривоги́на Д.Н. Управление календарно-сетевыми графиками строительства в условиях нестабильного мира // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12 (96). С. 707–720. EDN ODYQZZ.

13. Петроченко М.В., Недвига П.Н., Кукина А.А., Шерстюк В.В. Классификация строительной информации в BIM с использованием алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник МГСУ.

2022. Т. 17. № 11. С. 1537–1550. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550. EDN JFYSSO.

14. Гинзбург А.В., Рыжкова А.И. Возможности искусственного интеллекта по повышению организационно-технологической надежности строительного производства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 7–13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13. EDN XCIOMJ.

15. Теличенко В.И., Ланидус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL.

16. Петрухин А.Б., Щербакова Н.А. Развитие технологий искусственного интеллекта в строительстве // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 2. С. 67–77. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.2.67. EDN VJPORE.

17. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review // Sustainable Production and Consumption. 2023. Vol. 35. Pp. 509–524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002

18. Ghosh A., Sufian A., Sultana F., Chakrabarti A., De D. Fundamental Concepts of Convolutional Neural Network // Intelligent Systems Reference Library. 2019. Pp. 519–567. DOI: 10.1007/978-3-030-32644-9_36

19. Joshi K. Study of Tesseract OCR // GLS KALP: Journal of Multidisciplinary Studies. 2021. Vol. 1. Issue 2. Pp. 41–50. DOI: 10.69974/glskalp.01.02.54

20. Le C.C. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) Architecture. 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.22192.67845

21. Ahmadi E., Muley S., Wang C. Automatic construction accident report analysis using large language models (LLMs) // Journal of Intelligent Construction. 2025. Vol. 3. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.26599/JIC.2024.9180039

22. Zhang C., Deng Y., Lin X., Wang B., Ng D., Ye H. et al. 100 Days After DeepSeek-R1: A Survey on Replication Studies and More Directions for Reasoning Language Models // ArXiv. 2025. Pp. 1–37. DOI: 10.48550/arXiv.2505.00551

23. Wang H., Zhang D., Li J., Feng Z., Zhang F. Entropy-Optimized Dynamic Text Segmentation and RAG-Enhanced LLMs for Construction Engineering Knowledge Base // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Issue 6. P. 3134. DOI: 10.3390/app15063134

24. Pan X., Yang T.T. Y., Liu R., Xiao Y., Xie F. A computer vision and point cloud-based monitoring approach for automated construction tasks using full-scale

robotized mobile cranes // Journal of Intelligent Construction. 2025. Vol. 3. Issue 2. Pp. 1–11. DOI: 10.26599/jic.2025.9180086

25. Belaroussi R. Subjective Assessment of a Built Environment by ChatGPT, Gemini and Grok: Comparison with Architecture, Engineering and Construction Expert Perception // Big Data and Cognitive Computing. 2025. Vol. 9. Issue 4. P. 100. DOI: 10.3390/bdcc9040100

26. Langford A., Shah A., Gupta A., Bhatner A., Goyal A., Mathur A. et al. The Amazon Nova Family of Models: Technical Report and Model Card // ArXiv. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.12103

27. Pujari N.K., Miriyala S.S., Mitra K. Generative Adversarial Networks for Modelling Uncertainties in Wind Farm Design // Engineering Optimization: Methods and Applications. 2025. Pp. 173–192. DOI: 10.1007/978-981-97-7909-3_10

28. Williams A.S. EVM-based Risk Management in Construction Projects: A Case Study. 2025.

29. Garudasu S., Byri A., Nadukuru S., Goel O., Singh N. Building interactive dashboards for improved decision-making: a guide to power bi and dax // International Journal of Worldwide Engineering Research. 2025. Pp. 188–209.

Поступила в редакцию 1 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 26 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Людмила Анатольевна Опарина — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации производства и городского хозяйства, советник РААСН; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 9064-6192, Scopus: 57128068100, ResearcherID: V-5060-2017, ORCID: 0000-0001-5534-727X; L.A.Oparina@gmail.com;

Евгений Александрович Барзыгин — кандидат технических наук, доцент кафедры организации производства и городского хозяйства; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 5227-5484, ORCID: 0009-0002-7542-0686, Google ScholarID: G4JW2h8AAAAJ; barzygin@mail.ru;

Валерий Альбертович Огурцов — доктор технических наук, профессор кафедры строительства и инженерных систем; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 5273-0608; ogurtzovvavork@mail.ru;

Роман Сергеевич Карась — заместитель директора Департамента цифровизации; **Газстройпром**; 196006, г. Санкт-Петербург, ул. Ташкентская, д. 3, корп. 3, лит. Б; KarasRS@gspprom.ru.

Вклад авторов:

Опарина Л.А. — научное редактирование текста, обработка материала, участие в написании введения, выводов и заключения.

Барзыгин Е.А. — идея, сбор материала, проведение расчетов, участие в выборе методологии и методов исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Огурцов В.А. — обработка материала, участие в написании введения, выводов и заключения.

Карась Р.С. — сбор материала, участие в написании итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Slepushkin D.V., Burlov D.Yu. Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):440-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455. EDN MYHCAL. (rus.).

2. Suleimanova L.A., Obaidi A.A.H., Ryabchevsky I.S. *Life cycle management of capital construction projects using neural network forecasting of building heat loss*. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2024; 164. EDN UYZPHS. (rus.).

3. Petrukhin A.B., Shcherbakova N.A. Artificial intelligence in the construction industry. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Construc-*

tions. Technologies. 2024; 2:67-77. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.2.67. EDN VJPORE.(rus.).

4. Gazarov A.R. Advantages of using artificial intelligence in the field of construction. *Izvestiya Tula State University*. 2020; 4:136-139. EDN DZQOPN. (rus.).

5. Kolchin V.N. The specifics of the use of “artificial intelligence” technology in construction. *Innovation & Investment*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).

6. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022; 141:104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440

7. Karamanyants M.B. Changes in the construction industry with the active implementation of technology using artificial intelligence (AI). *Construction Economics*. 2023; 9:141-145. EDN SBRLCQ. (rus.).
8. Gorodnova N.V. Application of artificial intelligence and nanotechnology in the investment and construction sector in Russia. *Vestnik NSUEM*. 2021; 3:81-95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR. (rus.).
9. Korol S.P., Korol R.A. Algorithmic approach in network modeling in construction: graphical solutions and optimization tasks. *Russian Journal of Housing Research*. 2023; 10(3):317-332. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118842. EDN CTTTEW. (rus.).
10. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Application of Markov random processes for risk assessment in construction projects. *Modern problems of project management in the investment and construction sphere and nature management : proceedings of the XV International scientific and practical conference*. 2025; 99-104. EDN IZUOGT. (rus.).
11. Yarkova O.N., Sidorenko N.A. Modelling construction time by discrete Markov chains. *Engineering journal of Don*. 2024; 2(110):506-519. EDN QUFHYZ. (rus.).
12. Khristoforova K.A., Demidova V.S., Krivogina D.N. Managing calendar and network schedules of construction in an unstable world. *Engineering journal of Don*. 2022; 12(96):707-720. EDN ODYQZZ. (rus.).
13. Petrochenko M.V., Nedviga P.N., Kukina A.A., Sherstyuk V.V. Classification of information models in BIM using artificial intelligence algorithms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1537-1550. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550. EDN JFYSSO. (rus.).
14. Ginzburg A.V.E., Ryzhkova A.I. Artificial intelligence capabilities for increasing organizational-technological reliability of construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(1):(112):7-13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13. EDN XCIOMJ. (rus.).
15. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL. (rus.).
16. Petrukhin A.B., Shcherbakova N.A. Artificial intelligence in the construction industry. *Vestnik of Volga State University of Technology Series*. 2024; 2:67-77. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.2.67. EDN VJPORE. (rus.).
17. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review. *Sustainable Production and Consumption*. 2023; 35:509-524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002
18. Ghosh A., Sufian A., Sultana F., Chakrabarti A., De D. Fundamental Concepts of Convolutional Neural Network. *Intelligent Systems Reference Library*. 2019; 519-567. DOI: 10.1007/978-3-030-32644-9_36
19. Joshi K. Study of Tesseract OCR. *GLS KALP: Journal of Multidisciplinary Studies*. 2021; 1(2):41-50. DOI: 10.69974/glskalp.01.02.54
20. Le C.C. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) Architecture. 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.22192.67845
21. Ahmadi E., Muley S., Wang C. Automatic construction accident report analysis using large language models (LLMs). *Journal of Intelligent Construction*. 2025; 3(1):1-10. DOI: 10.26599/JIC.2024.918-0039
22. Zhang C., Deng Y., Lin X., Wang B., Ng D., Ye H. et al. 100 Days After DeepSeek-R1: A Survey on Replication Studies and More Directions for Reasoning Language Models. *ArXiv*. 2025; 1-37. DOI: 10.48550/arXiv.2505.00551
23. Wang H., Zhang D., Li J., Feng Z., Zhang F. Entropy-Optimized Dynamic Text Segmentation and RAG-Enhanced LLMs for Construction Engineering Knowledge Base. *Applied Sciences*. 2025; 15(6):3134. DOI: 10.3390/app15063134
24. Pan X., Yang T.T. Y., Liu R., Xiao Y., Xie F. A computer vision and point cloud-based monitoring approach for automated construction tasks using full-scale robotized mobile cranes. *Journal of Intelligent Construction*. 2025; 3(2):1-11. DOI: 10.26599/jic.2025.9180086
25. Belaroussi R. Subjective Assessment of a Built Environment by ChatGPT, Gemini and Grok: Comparison with Architecture, Engineering and Construction Expert Perception. *Big Data and Cognitive Computing*. 2025; 9(4):100. DOI: 10.3390/bdcc9040100
26. Langford A., Shah A., Gupta A., Bhattar A., Goyal A., Mathur A. et al. The Amazon Nova Family of Models: Technical Report and Model Card. *ArXiv*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.12103
27. Pujari N.K., Miriyala S.S., Mitra K. Generative Adversarial Networks for Modelling Uncertainties in Wind Farm Design. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. 2025; 173-192. DOI: 10.1007/978-981-97-7909-3_10
28. Williams A.S. EVM-based Risk Management in Construction Projects: A Case Study. 2025.
29. Garudasu S., Byri A., Nadukuru S., Goel O., Singh N. Building interactive dashboards for improved decision-making: a guide to power bi and dax. *International Journal of Worldwide Engineering Research*. 2025; 188-209.

Received October 1, 2025.

Adopted in revised form on November 26, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

B I O N O T E S: **Lyudmila A. Oparina** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Production and Urban Economy, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky prospekt, Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 9064-6192, Scopus: 57128068100, ResearcherID: V-5060-2017, ORCID: 0000-0001-5534-727X; L.A.Oparina@gmail.com;

Evgenii A. Barzygin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Organization of Production and Municipal Economy; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky prospekt, Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 5227-5484, ORCID: 0009-0002-7542-0686, Google ScholarID: G4JW2h8AAAAJ; barzygin@mail.ru;

Valery A. Ogurtsov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction and Engineering Systems; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky prospekt, Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 5273-0608, ogurtzovvawork@mail.ru;

Roman S. Karas — Deputy Director of the Digitalization Department; **Gazstroyprom**; lit. B, build. 3, 3 Tashkentskaya st., St. Petersburg, 196006, Russian Federation; KarasRS@gsprom.ru.

Contribution of the authors:

Lyudmila A. Oparina — scientific editing of the text, processing of the material, participation in the formation of the introduction, findings and conclusion.

Evgenii A. Barzygin — idea, collection of material, calculations, participation in the selection of methodology and research methods, writing the original text, final conclusions.

Valery A. Ogurtsov — processing of material, participation in the formation of the introduction, conclusions and findings.

Roman S. Karas — collection of material, participation in the formation of final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Мегаполисы как центры научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития Китая

Татьяна Владимировна Бернюкевич¹, Алена Александровна Бернюкевич²,
Сунь Янь³

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

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ);
г. Москва, Россия;

³ Хэйлунцзянский университет иностранных языков (НИУ); г. Харбин, Китайская Народная Республика

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического пространства Китая определяется необходимостью изучения механизмов реализации государственной политики в экономической и социальной сферах, анализа принципов управления экономическими системами и оценки методов стратегического менеджмента в контексте инновационного развития. Цель исследования — выявление параметров и основных направлений развития китайских мегаполисов как инновационных центров.

Материалы и методы. Применены методы: восхождения от абстрактного к конкретному, сравнительный, исторический и структурно-функциональный, анализ данных. Использование данных методов позволяет исследовать механизмы разработки и реализации государственной политики, принципы управления сложными экономическими системами и формы стратегического управления инновационным развитием. Исследование базируется на анализе китайских источников и работ китайских авторов.

Результаты. Определены особенности развития мегаполисов как центров инновационно-технологического развития в Китае, включая: системный анализ государственной политики поддержки инноваций на национальном и региональном уровнях; выявление принципов и методов управления экономическими системами мегаполисов; оценку эффективности различных стратегий инновационного развития и моделей взаимодействия государства, науки и бизнеса.

Выводы. Развитие инноваций и новых технологий в Китае демонстрирует эффективную модель сочетания стратегического государственного планирования с гибкими методами управления на региональном уровне. Реализация особой политики инновационной поддержки осуществляется через комплекс мер и механизмов государственного регулирования экономических систем, включая создание национальных научных центров, специальных экономических зон и многоуровневую систему стимулирования. Китайский опыт представляет значительный интерес для изучения методов стратегического менеджмента в условиях трансформации городов в глобальные инновационные центры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инновационные центры, инновационная научно-техническая деятельность, политика инновационной поддержки, модели инновационного развития, инновационные изменения, управление инновационно-технологическим развитием, мегаполисы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бернюкевич Т.В., Бернюкевич А.А., Сунь Я. Мегаполисы как центры научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития Китая // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 122–134. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.122-134

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Владимировна Бернюкевич, bernyukevich@inbox.ru.

Megacities as centres of scientific and technical activity and innovative economic development in China

Tatiana V. Bernyukevich¹, Alena A. Bernyukevich², Sun Yan³

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

² National Research University Higher School of Economics; Moscow, Russian Federation;

³ Heilongjiang University of Foreign Languages; Harbin, People's Republic of China

ABSTRACT

Introduction. The relevance of studying megacities as centres of scientific and technological activity and innovative economic space in China. The need to study the principles of implementing public policy in the economic and social world,

analyze the management of economic trends, and evaluate public administration methods in the third innovative development period is determined. The aim of the study is to identify the parameters and main development directions of Chinese megacities as promising centres.

Materials and methods. Methods of ascending from the abstract to the concrete, comparative, historical and structural-functional analysis of data were applied. The use of these methods allows us to investigate the mechanisms of development and implementation of public policy, the principles of managing complex economic systems and forms of strategic management of innovative development. The study is based on an analysis of Chinese sources and works by Chinese authors.

Results. Determining the direction of development of megacities as centres of innovative and technological development in China, including: a systemic analysis of public policy supporting innovation in the region and its outskirts; identifying the consequences and methods of managing economic cycles in megacities; and assessing the effectiveness of various innovative development strategies and models of interaction between government, science, and business.

Conclusions. Developing Innovation and New Technologies in the Chinese Carbon Model: Implementing a unique innovation support policy through a set of measures and principles for regulating economic systems, including the creation of national research centres, a special economic zone, and a multi-tiered incentive system. The Chinese experience offers an alternative perspective for exploring management methods in the context of transforming cities into global innovation hubs.

KEYWORDS: innovation centres, innovative scientific and technical activities, innovation support policy, models of innovative development, innovative changes, management of innovative and technological development, megacities

FOR CITATION: Bernyukevich T.V., Bernyukevich A.A., Sun Ya. Megacities as centres of scientific and technical activity and innovative economic development in China. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):122-134. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.122-134 (rus.).

Corresponding authors: Tatiana V. Bernyukevich, bernyukevich@inbox.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития (на примере Китая) определяется важностью решения вопросов управления опережающего инновационного развития, стратегии которого связаны с использованием пространства мегаполисов. Организация инновационных центров и их управление невозможны без значительных изменений в градостроительстве и городской политике. Мегаполисы позволяют концентрировать научный и технологический потенциал, привлекательны с точки зрения наличия городских коммуникаций и многих других составляющих их структуры. Формирование национальных инновационных систем, основанных на создании и управлении инновационными центрами, обычно осуществляется в период смены технологических укладов. Важен не только результат их создания, но и анализ процесса, в ходе которого происходит налаживание связей между элементами и субъектами инновационной деятельности на определенной территории, в том числе и территории мегаполиса.

Значимость исследования мегаполисов Китая как инновационно-экономического пространства обусловлена и трансформацией Китая в глобальную технологическую державу. Именно мегаполисы становятся центрами этой трансформации, где концентрируются инвестиции, человеческие ресурсы и исследовательская инфраструктура, необходимые для прорывных инноваций. Такие города, как Шэньчжэнь, Пекин и Шанхай, стали полноценными хабами, конкурирующими с Кремниевой долиной в областях искусственного интеллекта, квантовых вычислений, биотехнологий и телекоммуникаций. Изучение модели успеха, наблюдаемого на инновационно-экономическом пространстве этих мегаполисов, актуально для понимания будущего глобального технологического ландшафта. Эти города являются полигонами

для апробации и внедрения политик, направленных на технологическое лидерство.

Не менее важна в исследовательском плане роль пилотных зон и кластеров, располагающихся на территориях страны, в том числе и территориях мегаполиса. В Китае в мегаполисах целенаправленно основываются специальные зоны, такие как национальные зоны экономического и технологического развития и научно-технологические парки (например, Чжунгуаньцунь в Пекине). Бесспорный интерес, по мнению многих специалистов в рассматриваемой области, представляет анализ экономической эффективности и агломерационного эффекта инновационного развития мегаполисов [1–6]. Речь, прежде всего, идет об управлении концентрацией ресурсов. Мегаполисы обеспечивают синергический эффект от взаимодействия между университетами, научно-исследовательскими институтами, венчурным капиталом и крупными корпорациями (как государственными, так и частными, как Huawei, Tencent, Alibaba). Организация такой концентрированной научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития ускоряет коммерциализацию научных открытий. Результаты данного анализа позволяют не только установить специфику создания и управления инновационными центрами в мегаполисах Китая, но и выявить условия обеспечения городского инновационного пространства мегаполисов в целом.

Актуальность исследования определяется также его значимостью для стратегического менеджмента на национальном и городском уровнях. Анализ китайских мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития раскрывает практику формирования и реализации долгосрочных стратегий, в которых согласуются цели технологического лидерства, пространственного развития и экономического роста.

Изучение того, как стратегическое видение (например, превращение Китая в «мировую инновационную державу») транслируется в конкретные стратегические планы для мегаполисов (Пекина, Шэньчжэня, Шанхая), а затем в оперативные мероприятия (создание зон, кластеров, инфраструктуры), представляет собой оригинальную модель многоуровневого стратегического управления.

Исследованию центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития мегаполисов в Китае посвящен ряд работ российских авторов. Так, роль КНР в мировом инновационном развитии рассматривается в работах известного российского экономиста Б.А. Хейфеца [1, 2], эти идеи также обосновывает специалист по китайской экономике Д.М. Селихов [3–5]. Сравнение инновационно-экономического развития Китая и России также привлекает внимание исследователей, в том числе китайских. В публикациях Чжоу Цзэлиня представлена попытка определить китайскую специфику в моделях взаимодействия высшего образования и центров инноваций, подчеркивается необходимость адаптации мирового опыта к национальным условиям [6]. О роли опыта инновационного развития китайских регионов для России пишет Ван Юйшань [7]. Особенности инновационных зон Китая анализируются в работах А.Г. Аганбегяна, в которых подчеркивается, что успешный опыт экономического стратегирования в Китае полезен для других стран [8]. Этот опыт получает осмысление в программных докладах ведущих востоковедных центров России, таких как Институт Китая и современной Азии РАН, Институт стран Азии и Африки МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт востоковедения РАН [9]. Глобальный потенциал инновационных центров Китая выявляется в исследованиях И.В. Диановой-Клоковой, Д.А. Метаньевой [10].

Вопросам экономического развития Китая посвящены и совместные исследования, например, белорусско-китайская монография «Китай в XXI веке — мировая инновационная держава» М.М. Ковалева и Ван Син [11].

Роль науки и образования в инновационных процессах в Китае также рассматривается в ряде работ. Среди них можно назвать публикации И.И. Осинского [12], Т.Л. Гурулевой, Бин Вана и др. [13]. Ли Цюлин, Сун Цзиньюй, Чжун Чжэньбинь, Сян Лэй, Вэй Синьсинь, Лю Суя, Ван Юйсинь, Юй Таожань в исследовании комплексных национальных научных центров Китая подчеркивают необходимость усиления межрегионального сотрудничества для превращения этих центров в «двигатели» инновационно-экономического развития и «новой производительности» [14].

В китайском научном пространстве можно выделить труды, в которых анализируется роль крупных городов и мегаполисов в управлении глобальной трансформацией экономики страны. Их результаты,

к примеру, нашли отражение в статьях Фан Чжихуна и Сян Хэна «Исследование пути пространственной трансформации для самообновляющегося развития мега- и крупных городов: с точки зрения глобальной технологической трансформации промышленности» [15, 16]. Специфика разных моделей развития городов «науки и технологий», влияние технологических инноваций на городское пространство и качество жизни населения определяется в публикациях Гун Чэня, У. Чуаньцина, Чжоу Вэня [17, 18]. Для анализа становления и развития технологических инноваций на территориях мегаполисов целесообразно применение исследований управления крупными финансовыми компаниями, связанными с данными технологиями, таких как труды исследовательских подразделений China International Capital Corporation (CICC) [19].

Рассмотрение генезиса и перспектив развития инновационных мегаполисов Китая представлено в работах китайских авторов (Чжоу Вэнь, Бочао Чэнь, Хан Ван, Яцзе Чжоу, Хуйэ Сюй, Ин Ван, Чанфэн Ли, Цяньи Ло, Ша Чэнь) о факторах создания центров научно-технологической инноваций в региональном пространстве Китая, формировании и управлении современной пространственной моделью территорий городов, включающей интеграцию научно-технологических инноваций и городской инфраструктуры [20, 21].

Цель исследования — определение условий и основных направлений развития китайских мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического пространства. В рамках указанной цели выявляются особенности создания инновационных центров в мегаполисах Китая, основные направления развития городского инновационно-технологического пространства, роль науки и образования в этих процессах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития Китая проводится в контексте анализа государственной политики, направленной на инновационное развитие. Следует отметить, что формирование инновационных центров в мегаполисах является результатом целенаправленной государственной политики, включающей стратегическое планирование, разработку механизмов реализации и применение управленческих инструментов в экономической и социальной сферах. Исследование базируется на комплексном подходе, объединяющем разные аспекты анализа вопросов управления инновациями на пространствах мегаполисов Китая. Этот подход позволяет рассмотреть разные стороны сложного феномена развития китайских городов именно как центров инноваций, взаимодействие субъектов и элементов данного процесса.

Использовались следующие научные методы: метод восхождения от абстрактного к конкретному, сравнительный, исторический и структурно-функциональный методы, анализ и синтез и др. Метод восхождения от абстрактного к конкретному задает общую логику исследования. Он служит каркасом всей работы, позволяя перейти от общих теорий к пониманию конкретной реальности китайской экономики. В рамках данного метода исследование начинается с изучения общих теоретических концепций: мировой научный центр, глобальный инновационный центр промышленных инноваций и международный кластер инновационной экосистемы. Далее эти абстрактные понятия наполняются конкретным содержанием на примере Китая.

Метод позволяет выявить, как общемировые тенденции проявляются в уникальных китайских условиях. В таком случае становится возможным создание целостной теоретической модели китайского инновационного мегаполиса, которая будет не просто компиляцией общеизвестных идей проводившихся исследований, но отражать уникальные китайские черты (роль партийно-государственного планирования, специфика интеграции науки и производства). С этим связана и возможность прогнозирования дальнейшей эволюции китайских мегаполисов, исходя из выявленных внутренних закономерностей их развития, а не только из внешних аналогий по примерам других стран.

Сравнительный метод позволяет выявить уникальность китайского опыта и определить его место в глобальном контексте, кроме того, установить особенности и внутренние различия инновационных мегаполисов Китая. Так, анализ различий между инновационными моделями, например, таких городов, как Пекин, Шэньчжэнь, Шанхай дает возможность определить разные китайские модели инновационно-экономического развития этой страны. А сопоставление китайских мегаполисов помогает выявить конкурентные преимущества и слабые стороны Китая. Классификация китайских мегаполисов на типы по доминирующему инновационному профилю упростит их дальнейшее изучение и позволит проводить более точные кросс-национальные сравнения. Данный метод выступает также инструментом стратегического анализа конкурентной среды: сравнение моделей развития Пекина, Шэньчжэня и Шанхая помогает установить их стратегическое позиционирование и ключевые роли в глобальной инновационной сети.

Исторический метод необходим для понимания генезиса и траектории развития инновационных центров Китая, изучения того, как мегаполисы проходили путь от «зон технико-экономического развития» к «национальным комплексным научным центрам». Это показывает поступательный и планомерный характер их развития. Исторический контекст объясняет, в том числе, почему Китай

долгое время находился в фазе «догоняющего развития» и какие факторы позволили Китаю от фазы «догоняющего развития» перейти к фазе собственных прорывных инноваций. Также метод полезен для выявления долгосрочных трендов и циклов в инновационном развитии китайских городов.

На основе структурно-функционального метода определяются ключевые принципы управления мегаполисом как основой инновационно-экономического развития страны. К ним относятся: принцип централизованного стратегического планирования при целеполагании и принцип децентрализованной гибкой реализации задач на уровне отдельных кластеров и предприятий; принцип концентрации ресурсов на прорывных направлениях; принцип синергии между элементами инновационной экосистемы (государство – наука – бизнес). Анализ этих принципов раскрывает специфику управления сложной экономической системой в условиях догоняющей и опережающей модернизации. В итоге мегаполис определяется как сложная инновационно-экономическая система, где каждый элемент играет свою роль для достижения общей цели. Возможности метода связаны также с выявлением ключевых элементов этой системы — мегаполиса, исследованием функций каждого элемента (например, функция университета — не только готовить кадры, но и генерировать стартапы; функция технопарка — быть «инкубатором», связывающим науку и бизнес), изучением того, как эти элементы взаимодействуют. На основе этого метода возможно моделирование оптимальной структуры мегаполисов как центров научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития для достижения поставленных стратегических целей.

Использование сравнительного и исторического методов позволяет также выявить роль государственной политики в области инноваций, а структурно-функциональный метод дает возможность проанализировать механизмы взаимодействия между государственными институтами, научными организациями и бизнес-структурами. Таким образом, методологический аппарат исследования ориентирован, в том числе, на изучение государственной политики как системы целей и инструментов инновационного управления в мегаполисах Китая.

Исследование представленной в статье проблематики на основе анализа оригинальных китайских источников и исследований китайских авторов [6, 14–18, 21–26] открывает ряд важных преимуществ и научных перспектив. Ключевые из них: прямой доступ к официальным данным и политическим концепциям, глубокое понимание китайских моделей управления инновациями, анализ реальных управленческих кейсов и их эффективности, выявление региональных различий и специализации, понимание роли высшего образования, прогнозирование будущих трендов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пространственная трансформация и инновационное развитие мегаполисов

Современный этап глобального технологического соперничества выдвигает на первый план способность государств не только генерировать отдельные инновации, но и целенаправленно трансформировать свои ключевые экономические системы для системного прорыва. В этом контексте мегаполисы Китая представляют собой уникальный объект исследования, поскольку их стремительная пространственно-функциональная эволюция является прямым результатом комплексной государственной политики и стратегического управления. Развитие таких центров, как Шэньчжэнь, Шанхай или Суньань, демонстрирует переход от отраслевого планирования к управлению сложными пространственно-экономическими экосистемами. Один из центральных вопросов исследования, каким образом механизмы и методы государственного управления от макростратегий (таких как «Массовые инновации и массовое предпринимательство» или инициатива «Пояс и путь») до инструментов пространственного планирования (специальные экономические зоны, пилотные программы «умного города») перестраивают городское пространство.

Общеизвестно, что инновационное развитие мегаполисов во многом определяется их возможностями к обновлению и пространственной трансформации. Становление городских инновационно-технологических центров невозможно без изменений пространственной формы городов и моделей их развития в соответствии с развитием научно-технических отраслей и глобальной повесткой инновационных технологий. Именно мегаполисы, по мнению Фан Чжихуна и Сян Хэна, являются и основным источником, и лидерами глобальной трансформации научно-технологического процесса. Мегаполисы становятся зонами инноваций, технологическими инкубаторами, началом формирования новых наукоемких отраслей. В качестве основной проблемы развития таких инновационных кластеров в мегаполисах Китая эти авторы видят то, что города Китая долгое время находились в направлении имитирующего и догоняющего развития, во многом обусловленного историей Китая в XX в. [15].

При этом в настоящее время, считают исследователи, Китай обладает мощным потенциалом для того, чтобы возглавить глобальную научно-технологическую трансформацию. Сегодня страна переходит от подражаний, имитаций и заимствований технологий к самостоятельным инновационным технологическим прорывам [15, 16]. В инновационной трансформации городских пространств выделяются ряд основных векторов.

Первый вектор — это новый импульс развития: от кумулятивного процесса к инновационным революциям на основе информации и нового типа

знаний. Это ярко проявляется в политике «массовые инновации и массовое предпринимательство», запущенной в 2015 г. Ее прямым пространственным следствием стал взрывной рост числа инновационных хабов в мегаполисах, таких как Чжунгуаньцунь в Пекине. К 2023 г. в Чжунгуаньцуне было сосредоточено около 40 % инвестиций Китая в венчурный капитал и действовали десятки «единорогов» (частные стартапы, чья рыночная оценка превышает 1 млрд \$), что превратило его из «электронной улицы» в национальную демонстрационную зону самостоятельных инноваций.

Второй — структурно-функциональное изменение городского пространства. Оно связано с переходом от традиционного зонирования собственного города и промышленных пространств к более сложной пространственной модели, интегрирующей инновации, промышленность и город. Основой для такой сложной диверсификационной модели становится информатизация. При этом в каждом отдельном случае она может иметь индивидуальный характер. Примером являются развитие Научно-инновационного пояса реки Чжуцзян (концепция развития высокотехнологичных отраслей и инновационной экономики в бассейне р. Чжуцзян, центром которой является Гуанчжоу) и Западного научно-технического коридора Шэньчжэня (стратегически важного региона в рамках Большого залива Гуандун – Гонконг – Макао, который фокусируется на инновациях, высоких технологиях, исследованиях и цифровых разработках). В Гуанчжоу это выразилось в создании кластера «городской испытательной зоны искусственного интеллекта» и цифровой экономики в районе Хайчжу и Гуанчжоуского научного городка, где исследовательские институты, университеты и жилые кварталы спроектированы как единая экосистема. [15, 16].

Третий связан с переходом от модели трансформации и повтора к собственным инновационным моделям. В рамках этого вектора большую значимость приобретают взаимосвязи субъектов инноваций и формирование целостных инновационных экосистем. Так, мегаполис Шэньчжэнь прошел путь развития от «фабрики мира» к варианту китайской Кремниевой долины, его модель «завод – исследования – рынок» сформировала уникальную инновационную систему. Он имеет статус главного технологического хаба Китая, где расположены штаб-квартиры гигантов вроде Huawei, Tencent, DJI, BYD, а также тысячи стартапов, производящих электронику [17].

Четвертый вектор основывается на переходе от ценности земли, труда, промышленных площадей и т.п. к конкурентным преимуществам инновационных факторов. Часто эта инновационная прибавочная стоимость связана с ценностью знаний и информации. К примеру, стоимость земли и активов в районе Пудун (Шанхай) долгое время опреде-

лялась ее финансовым статусом. Однако с созданием Шанхайской зоны пилотной свободной торговли (SFTZ) и особым налоговым режимом для высокотехнологичных предприятий ключевой ценностью становится доступ к глобальным финансовым потокам, специализированным кадрам и регуляторным экспериментам, что формирует своеобразную «инновационную ренту».

Пятый — методологические изменения в решении вопросов развития города. В методологии развития городских пространств и оценке результативности и эффективности этого развития акцентируются такие характеристики, как адаптивность, включенность, интегративность и вариативность трансформации городских систем [15]. Новые подходы к планированию видны в проекте «Город-губка» (Sponge City), масштабно реализуемом в Шэньчжэне, Ухане и других мегаполисах [18]. Этот проект, нацеленный на адаптивность к климатическим изменениям через создание «проницаемых поверхностей» и «умных» водных систем, оценивается не только по инженерным, но и по экологическим, социальным и экономическим параметрам интегративности, что меняет логику градостроительной эффективности.

Кроме того, рядом авторов справедливо отмечается необходимость определения новых направлений изучения пространственной трансформации мегаполисов. Это обусловлено трансформацией системы «физико-виртуального» пространства города в информационное, что накладывает отпечаток на социальные характеристики городской среды. Практическим воплощением данного тренда является организация в Ханчжоу «Городского мозга» (City Brain) — общегородской платформы на основе ИИ для управления транспортными потоками, безопасностью и коммунальными службами, что создает новое виртуально-физическое измерение среды мегаполиса [19]. Функциональная система городского пространства эволюционирует в особую сложную пространственно-временную систему. Активное развитие виртуально-информационного пространства города способствует созданию ситуации инновационной ренты. По-новому осмысливается связь культурного наследия и инновационного развития городов, она рассматривается как отражение особенностей цивилизационного развития, оригинальный вариант ответа на вызовы времени. Примером служит Шанхай, где ревитализация исторической набережной Вайтань и района Тианцзыфан сочетается с размещением в этом пространстве дизайн-студий и инкубаторов творческих индустрий, созданием зон «инновационного наследия».

Радикальное преобразование городского пространства, социокультурные трансформации в соответствии с задачами инновационного развития городов, разработка принципиально новых (по сравнению с традиционными индустриально-урбанизационными) моделей, по мнению Фан Чжихуна

и Сян Хэна, становятся залогом победы китайских городов в глобальной инновационной конкуренции [15]. Строительство «города будущего» Сюньбяня как масштабного национального проекта, призванного разгрузить Пекин и стать новой моделью умного, экологичного и инновационно ориентированного мегаполиса, является самым амбициозным подтверждением этого тезиса. Пространственная трансформация городов — не следствие, а ключевой фактор инновационного развития Китая, обеспечивающий переход от догоняющей модели к глобальному технологическому лидерству. Эта трансформация характеризуется несколькими фундаментальными сдвигами:

1. Качественное изменение парадигмы развития: переход от кумулятивного роста к скачкообразным инновациям на основе информации и знаний, где мегаполисы становятся центрами генерации новых технологий и наукоемких отраслей.

2. Принципиально новая организация городского пространства: отказ от традиционного функционального зонирования в пользу сложных, интегративных моделей, где инновации, промышленность и городская среда образуют единый организм. Основой этой модели выступает информатизация.

3. Формирование собственных инновационных моделей территорий: переход от копирования западных образцов к созданию уникальных экосистем, основанных на тесной взаимосвязи всех субъектов инновационного процесса.

4. Изменение источников конкурентоспособности: ключевой ценностью становятся не материальные активы (земля, труд), а инновационные факторы и «инновационная рента», порождаемая знаниями и информацией.

5. Эволюция подходов к управлению: акцент смещается на такие параметры, как адаптивность, интегративность и вариативность, что позволяет городским системам гибко реагировать на вызовы времени.

Радикальное преобразование среды мегаполисов рассматривается как стратегический ресурс, позволяющий Китаю не только адаптироваться к глобальным технологическим тенденциям, но и активно формировать их, утверждая свои цивилизационные ориентиры в новом технологическом укладе.

Проведенный анализ пространственной трансформации китайских мегаполисов позволяет сделать вывод о формировании целостной государственной политики инновационного развития, реализуемой через уникальное сочетание централизованного стратегического целеполагания и гибкого, часто экспериментального управления на местном уровне [20]. Механизмы разработки и реализации этой политики демонстрируют высокую адаптивность: от создания особых регуляторных и налоговых режимов в Шанхайской зоне свободной торговли и районе Цяньхай (Шэньчжэньская зона свободной торговли) до запуска масштабных пилотных проектов, таких

как «Город-губка» или «Городской мозг», с их последующим масштабированием. Наблюдается переход от управления отраслями к управлению экосистемами, где государство выступает архитектором среды мегаполисов, аккумулирующей капитал, знания и таланты, а бизнес и научные институты становятся основными драйверами роста.

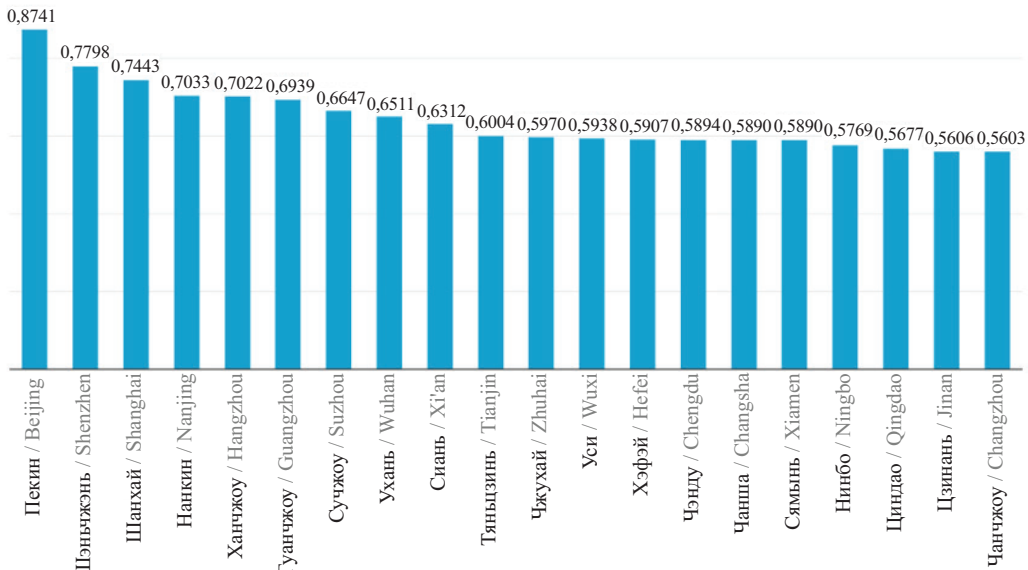
Научно-технологические инновации в городском пространстве

К характеристикам инновационного развития городов в Китае относят инновации в городской науке и технологиях. В настоящее время в Китае существует система рейтинга городов по развитию такого рода инноваций. Так, в 2020 г. в Топ-20 городов по индексу развития инноваций в городской науке и технологиях входили такие города, как: Пекин, Шэньчжэнь, Шанхай, Нанкин, Ханчжоу, Гуанчжоу, Сучжоу, Ухань, Сиань, Тяньцзинь и т.д. (рис.).

Индекс развития инноваций включает четыре показателя первого уровня: инновационные ресурсы, инновационная среда, инновационные услуги

и инновационная эффективность. Показатели второго уровня включают инновационные таланты, фонды НИОКР, политическую среду, информационную среду, предпринимательские услуги, финансовые услуги, научно-техническую продукцию, экономическое развитие, зеленое развитие, лидерство в области радиационных исследований и технологий и т.д. По индексу развития инноваций выделяют города разных уровней (табл.) [21].

Исследователи отмечают, что система индексирования городов по уровням инноваций определила ряд особенностей в региональном развитии Китая, часть которых можно отнести к недостаткам. Так, отмечаются очевидные различия между городами в северных и южных регионах, а именно: инновационный научно-технический потенциал южных городов, как правило, выше. При этом за последние годы этот разрыв только увеличился, и в инновационном развитии лидирует юго-восточный регион. К недостаткам в области накопления и концентрации в городском пространстве городских ресурсов



Топ-20 городов Китая по индексу развития инноваций в области науки и технологий в 2020 г.

Top 20 Chinese cities by Science and Technology Innovation Development Index in 2020

Сравнение распределения индекса развития инноваций в городах разных уровней

Comparison of the distribution of the innovation development index in cities of different levels

Территория Territory	Выборка Sample	Индекс развития инноваций 2020 Innovation Development Index 2020		Индекс развития инноваций 2019 Innovation Development Index 2019	
		Средняя величина Average value	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Средняя величина Average value	Коэффициент вариации Coefficient of variation
Города «первой линии» First-line cities	4	0,773	0,098	0,775	0,099

Окончание табл. / End of the Table

Территория Territory	Выборка Sample	Индекс развития инноваций 2020 Innovation Development Index 2020		Индекс развития инноваций 2019 Innovation Development Index 2019	
		Средняя величина Average value	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Средняя величина Average value	Коэффициент вариации Coefficient of variation
Города «второй линии» Second-line cities	30	0,551	0,137	0,558	0,142
Города «третьей линии» Third-line cities	71	0,386	0,208	0,390	0,204
Города «четвертой линии» Fourth-line cities	181	0,267	0,191	0,269	0,186

относят, в том числе отсутствие программ по выявлению талантливых людей и фондов, реализующих программы поддержки инновационных проектов, кроме того, необходимо увеличивать не только количество научных исследований, но и их качество.

Инновационный потенциал крупных городов увеличивает инновационную открытость и международное сотрудничество, стимулирует создание и совершенствование экосистемы инноваций. В городском планировании и градостроительстве за основу берется именно инновационное развитие, которое создаст возможности для функционирования глобально конкурентных крупных городских агломераций [21].

Сравнительный анализ инновационного потенциала китайских мегаполисов

Сравнительный подход к определению специфики инновационного развития китайских мегаполисов позволяет установить характерные черты конкретных городских пространств, модели их инновационного развития, проблемы их совершенствования как центров инновации. При этом также создается обобщенная модель «будущих городов науки и технологий» [22].

Так, к примеру, в рамках данной проблематики рассматриваются Пекин, Тяньцзинь, Ухань и Ханчжоу. К характеристикам «будущих городов науки и технологий» относят наличие в мегаполисах высокотехнологичной базы инноваций и предпринимательства для талантливой молодежи, кластер научно-исследовательских институтов, а также производственный кластер для развития высокотехнологичных отраслей.

Именно такой инновационный мегаполис способен аккумулировать инновационные ресурсы, содействовать развитию высокотехнологичных отраслей, стать платформой для городской инновационной экономики. При разработке моделей инновационных городов имеет значение их географическое положение и функциональное зонирование. Так, выше-названные Пекин, Тяньцзинь, Ухань и Ханчжоу рас-

положены в национальных высокотехнологичных зонах, они разделены на научно-исследовательские, деловые и развлекательные, административные, жилые и другие функциональные зоны. Однако пространственное планирование в каждом городе имеет свои особенности: один центр, два парка и два ядра — в Пекине; две оси и четыре района — в Тяньцзине; один центр, две оси, девять парков и один район — в Ухане и три района — в Ханчжоу [23].

Несомненную значимость имеет организационная структура управления. Например, в Пекине и Ханчжоу есть специальные комитеты управления наукой и технологиями с сильной управленческой автономией. В Тяньцзине и Ухане есть офисы при комитетах управления высокотехнологичной зоной с сильной управленческой координацией.

Как уже говорилось, в модель инновационных городов в Китае включается высокотехнологичное производство. В мегаполисах складываются разные типы промышленного позиционирования и виды агломераций предприятий. В Пекине расположены основные крупные центральные предприятия, связанные с созданием новых типов энергии, материалов, информационных ресурсов. В Тяньцзине сосредоточены научно-технические, научно-исследовательские и опытно-конструкторские институты, сосредоточенные на разработке новых энергетических транспортных средств, биомедицинской продукции и т.д. В Ухане — диверсифицированные типы производств, связанные с оптоэлектроникой, высокотехнологичным оборудованием и т.д. В Ханчжоу расположены крупные частные предприятия, сосредоточенные на разработке информационных технологий, биомедицины, культурного творчества и т.д.

Безусловно, создание моделей инновационного развития в мегаполисах требует поддержки в рамках государственной политики. В Китае сформирована многоуровневая и комплексная система господдержки, включающая финансовые субсидии, фискальные и налоговые льготы, земельные субсидии, конкретную финансовую поддержку и поощрения для та-

лантливых ученых и изобретателей. На региональном уровне также вводятся различные преференции, направленные на развитие инновационных производств и поддержку научных центров.

К основным инструментам данной политики относятся:

1. Финансовые субсидии: предоставление финансового вознаграждения крупным проектам, научно-исследовательским институтам и технологическим предприятиям.

2. Финансовые и налоговые льготы: предоставление налоговых возвратов или льгот для высокотехнологических предприятий и научно-исследовательских институтов.

3. Земельные субсидии: предоставление субсидий на покупку и аренду жилья или субсидий на проценты по кредитам для предприятий и учреждений.

4. Финансовая поддержка: предоставление компенсации рисков и вознаграждений за кредиты предприятиям и услуги финансовых учреждений.

5. Стимулирование талантов: предоставление финансирования предпринимательства, субсидий на жилье и бизнес, жилищного обеспечения и т.д. высококлассных профессионалов и талантливой молодежи [23].

Таким образом, развитие мегаполисов — инновационных центров, «будущих городов науки и технологий» является в Китае ключевой целью научно-технического прогресса и промышленной модернизации. Приведенный перечень инструментов государственной политики показывает, как на практике осуществляется поддержка инноваций на разных уровнях, что связано с механизмами реализации государственной политики. Акцент делается на инновациях и развитии высокотехнологичной сферы, для реализации этих проектов принимаются соответствующие политические решения, направленные на формирование дифференцированной системы поддержки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Китайские мегаполисы, такие как Пекин, Шэньчжэнь, Шанхай, Нанкин, Ханчжоу, Гуанчжоу, Сучжоу, Ухань, Сиань, Тяньцзинь и т.д., являются в настоящее время центрами научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития. Данное исследование показало, что их становление и развитие стали возможными во многом благодаря комплексной государственной политике, которая включает как экономические, так и социальные аспекты, и реализуется через многоуровневую систему механизмов и инструментов.

К факторам создания подобных центров в Китае можно отнести: переход от кумулятивного процесса к инновационным качественным изменениям на основе новых типов знаний и информатизации; структурно-функциональное изменение городского пространства, оно включает создание сложной про-

странственной модели, интегрирующей инновации, промышленность и городскую инфраструктуру. На основе данной модели возможно становление целостных инновационных систем, построенных на взаимосвязи субъектов инноваций. В создании таких систем находит отражение и историко-культурная специфика города, и цивилизационные притязания современного Китая [24, 25].

Инновационный потенциал крупных городов увеличивает инновационная открытость и международное сотрудничество, это способствует не только быстрому развитию мегаполисов Китая, но и их глобальной конкурентоспособности. Развитие инноваций и новых технологий требует особой политики инновационной поддержки на государственном (общенациональном) и региональном уровнях. В Китае сформирована многоуровневая система, включающая комплекс финансовых инструментов от субсидий и налоговых льгот для организаций, занимающихся инновационными разработками и производством, до финансового поощрения талантливых ученых и изобретателей. Данная система создания особых инновационных зон в пространствах мегаполисов Китая позволила добиться впечатляющих результатов научно-технологического развития.

Китайские мегаполисы стали ключевыми центрами научно-технической деятельности и инновационно-экономического развития, играя важную роль в трансформации Китая в глобальную технологическую державу [26]. Это стало возможным благодаря ряду факторов:

- целенаправленной государственной политике, включающей создание комплексных национальных научных центров (в Шанхае, Хэфэе, Пекине, регионе Гуандун – Гонконг – Макао и Сиане), специальных экономических зон и многоуровневую систему поддержки (финансовые субсидии, налоговые льготы, стимулирование талантов);
- формированию целостных инновационных экосистем, в которых эффективно взаимодействуют университеты, научно-исследовательские институты, крупные корпорации и венчурный капитал. Особое значение имеет интеграция высшего образования в инновационные процессы по структурно встроенной модели;
- пространственной трансформации городов, которая заключается в переходе от традиционного зонирования к сложным моделям, интегрирующим инновации, промышленность и городскую инфраструктуру. Мегаполисы становятся полигонами для новых урбанистических решений;
- сдвигу в парадигме развития от имитации и догоняющего роста к собственным прорывным инновациям и качественным изменениям на основе новых знаний и информатизации;
- социально-экономическому воздействию, которое проявляется в агломерационном эффекте, притоке высококвалифицированных кадров и изменении

структуры занятости («эффект масштаба» и «эффект замещения»).

Китайский опыт демонстрирует эффективную модель государственной политики, которая сочетает стратегическое планирование на национальном уровне с гибкой реализацией на региональном и местном уровнях. Этот опыт представляет значительный интерес для исследования государственной политики, механизмов ее разработки и реализации в экономической и социальной сферах. Его анализ позволяет сделать вывод об успешном использовании потенциала мегаполисов как драйверов национального инновационного развития, сочетании стратегического государственного планирования с созданием концентрированных экосистем, что обеспечивает стране лидирующие позиции в глобальной технологической конкуренции.

Феномен китайских инновационных мегаполисов является ярким примером успешного стратегического менеджмента со сложными социально-эконо-

мическими системами в масштабах города и страны. Его отличительные черты: 1) четкая иерархия стратегий — от общенациональной цели до специализации отдельных городов и кластеров; 2) комбинирование различных форм стратегического управления — от директивного планирования (создание национальных научных центров) до стимулирования самоорганизующихся экосистем (венчурные кластеры); 3) активное использование сравнительного анализа и бенчмаркинга для выявления лучших практик и адаптации глобальных моделей к национальным условиям; 4) гибкость и адаптивность стратегий, проявившихся в переходе от имитации к инновациям и в способности перераспределять ресурсы между приоритетами. Таким образом, достижения КНР в сфере инноваций в значительной степени служат результатом выверенного стратегического проектирования и управления, где мегаполисы выступают ключевыми полигонами и драйверами реализации масштабных стратегических замыслов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хейфец Б.А. Китайский путь глобализации и Россия. М. : КУРС, 2021. 208 с. EDN HGMRLU.

2. Хейфец Б.А., Чернова В.Ю. Роль Китая в глобализации мировой экономики // Россия и современный мир. 2021. № 2 (111). С. 100–120. DOI: 10.31249/rsm/2021.02.07. EDN AOBHPC.

3. Селихов Д.М. КНР в мировом инновационном развитии // Мировая экономика и международные отношения. 2013. № 11. С. 21–28. EDN RJVVKV.

4. Хейфец Б.А., Селихов Д.М. Китай: инновационное развитие в условиях экономического кризиса // Проблемы Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 46–56. EDN LKXQNB.

5. Селихов Д.М. Роль транснациональных корпораций КНР в развитии национальной инновационной системы // Проблемы Дальнего Востока. 2012. № 5. С. 28–42. EDN VBOFVN.

6. 卓泽林. 高等教育参与国际科技创新中心建设的全球视野与中国行动. 比较教育研究. 2024; 46(10):42-51, 102. [Чжо Цзэлин. Глобальное видение и действия Китая в области участия высшего образования в строительстве международных центров научно-технических инноваций. Сравнительные исследования в образовании. 2024. № 46 (10). С. 42–51, 102]. DOI: 10.20013/j.cnki.ICE.2024.10.05

7. Юйшань В. Инновационное развитие китайских регионов: опыт и рекомендации для России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. Т. 12. № 2. С. 145–159. DOI: 10.18184/2079-4665.2021.12.2.145-159. EDN KNFFUT.

8. Аганбегян А.Г. «Кремниевые долины» — зоны инноваций в США, Китае, ЕС, России и других стра-

нах // Экономика науки. 2023. Т. 9. № 2. С. 8–19. DOI: 10.22394/2410-132X-2023-9-2-8-19. EDN FIDKXW.

9. Российская академия наук. Научно-консультативный совет по правовым, психологическим и социально-экономическим проблемам общества. Совместное заседание (Москва) / под общ. ред. академика РАН Г.А. Тосуняна // Китай: вчера, сегодня, завтра : мат. заседания 19 ноября 2022 г. М. : Новые печатные технологии, 2023. 188 с.

10. Дианова-Клокова И.В., Метаньев Д.А. Китай. Инновационные центры: стремление к лидерству // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 7–17. EDN UGUXAP.

11. Ковалев М.М., Син В. Китай в XXI веке — мировая инновационная держава. Минск : Белорусский государственный университет, 2017. 239 с. EDN PLPPVF.

12. Осинский И.И. Китай в мире науки // Евразийство и мир. 2019. № 1. С. 3–22. DOI: 10.18101/2306-630X-2019-1-3-22. EDN ZUDLBJ.

13. Гурулева Т.Л., Бин В. Высшее образование в КНР: институты и механизмы государственного и партийного управления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Социология. 2020. Т. 20. № 3. С. 636–654. DOI: 10.22363/2313-2272-2020-20-3-636-654. EDN NKOTIT.

14. 黎秋玲、宋金峪、钟振彬、项磊、魏鑫鑫、刘苏雅、王煜鑫、俞陶然. 探秘中国五大综合性国家科学中心, 羊城晚报, A06. 2025. [Ли Цюлин, Сун Цзиньюй, Чжун Чжэньбинь, Сян Лэй, Вэй Синьсинь, Лю Сюя, Ван Юйсинь, Юй Таожань. Изучение пяти комплексных национальных научных центров Китая // Вечерние новости Янчэна, A06. 2025].

15. 樊志宏, 向恒. 超大、特大城市自我更新发展空间变革路径研究 — 基于全球科技产业变革视角. *现代城市研究*. 2023; 11:28-33. [Фань Чжихун, Сян Хэн. Исследование путей пространственной трансформации для самообновляющегося развития мегаполисов и крупных городов: с точки зрения глобальной технологической трансформации промышленности // Современные урбанистические исследования. 2023. № 11. С. 28–33]. DOI: CNKI:SUN:XDCS.0.2023-11-005

16. Fang C., Yu D. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 162. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.014

17. Yang Z., Xu K. The Impact of Innovation Economy on Urban Form and Its Transformation: Taking Cases on Shenzhen // *The Urban Book Series*. 2025. Pp. 285–308. DOI: 10.1007/978-3-031-77752-3_15

18. Chikhi F., Li C., Ji Q., Zhou X. Review of Sponge City implementation in China: performance and policy // *Water Science & Technology*. 2023. DOI: 10.2166/wst.2023.312

19. Han Y., Cai J., Ma E., Du S., Lin J. Understanding Smart City Practice in Urban China: A Governance Perspective // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 9. P. 7034. DOI: 10.3390/su15097034

20. He J., Tan Y. Evolution logic of urban spatial growth governance and its enlightenment in China: From a perspective of spatial governance // *Journal of Urban Management*. 2025. Vol. 14. Issue 2. Pp. 590–606. DOI: 10.1016/j.jum.2024.11.014

21. 数看中国城市科技创新发展. *中国科技奖励*. 2021; 01:60-63. [Статистический анализ раз-

вития научных и технологических инноваций в китайских городах // *Премия Китая в области науки и технологий*. 2021. № 01. С. 60–63]. DOI: CNKI:SUN:ZKJL.0.2021-01-022

22. 龚晨, 吴传清. 特大城市“未来科技城”发展模式比较 — 以京津汉杭四市为例. *科技进步与对策*. 2014; 31(14):30-33. [Гун Чэнь, Вуаньцин У. Сравнение моделей развития «будущих городов науки и технологий» в мегаполисах: исследование Пекина, Тяньцзиня, Уханя и Ханчжоу // Научно-технический прогресс и контрмеры. 2014. № 31 (14). С. 30–33]. DOI: CNKI:SUN:KJJB.0.2014-14-007

23. 周文. 特大城市科技创新发展对人口集聚的影响 — 来自北京的证据. *城市学刊*. 2020; 41(05): 22-29. [Чжоу Вэнь. Влияние развития технологических инноваций в мегаполисах на агломерацию населения: данные из Пекина // Журнал урбанистических исследований. 2020. № 41 (05). С. 22–29]. DOI: CNKI:SUN:YYSZ.0.2020-05-004

24. Technological Innovation in China: Current State and Challenges // *The Rise of China's Innovation Economy*. 2024. Pp. 1–44. DOI: 10.1007/978-981-99-8231-8_1

25. Chen B., Wang H., Wang X. Innovation Like China: Evidence from Chinese Local Officials' Promotions // *China Economic Review*. 2024. Vol. 86. P. 102203. DOI: 10.1016/j.chieco.2024.102203

26. Zhou Y., Xu H., Wang Y., Li C., Luo Q., Chen S. Promoting coordinated spatial governance of mega-cities in China via spatial organization of metropolitan areas // *Frontiers of Urban and Rural Planning*. 2024. Vol. 2. Issue 1. DOI: 10.1007/s44243-024-00034-1

Поступила в редакцию 31 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Владимировна Бернюкевич — доктор философских наук, профессор, профессор кафедры менеджмента и инноваций, профессор кафедры социально-гуманитарных наук и технологий; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 274204, Scopus: 57195718426, ResearcherID: C-3085-2014 ORCID: 0000-0003-4471-0381; bernyukevich@inbox.ru;

Алена Александровна Бернюкевич — приглашенный преподаватель факультета мировой экономики и мировой политики; **Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)**; 109028, г. Москва, Покровский б-р, д. 11; РИНЦ ID: 1166436; ORCID: 0000 0002 0280 4139; bernyukevich.alena@mail.ru;

Сунь Янь — кандидат культурологии, профессор, декан факультета русского языка; **Хэйлунцзянский университет иностранных языков (НИУ)**; 150080, г. Харбин, ул. Хэйлунцзян, д. 6, Китайская Народная Республика; sunyannushi@126.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kheifets B.A. *The Chinese Path of Globalization and Russia*. Moscow, KURS, 2021; 208. EDN HGMRLU. (rus.).
2. Kheifets B.A., Chernova V.Yu. Role of China in globalization of the world economy. *Russia and the Contemporary World*. 2021; 2(111):100-120. DOI: 10.31249/rsm/2021.02.07. EDN AOBHPC. (rus.).
3. Selihov D. PRC in world innovation development. *World Economy and International Relations*. 2013; 11:21-28. EDN RJVVVKV. (rus.).
4. Heifez B., Selikhov D. China: innovative development during the world economic crisis. *Far Eastern Studies*. 2010; 1:46-56. EDN LKXQNB. (rus.).
5. Selikhov D. The role of transnational corporations in the development of China's national innovation system. *Far Eastern Studies*. 2012; 5:28-42. EDN VBOFVH. (rus.).
6. 卓泽林. 高等教育参与国际科技创新中心建设的全球视野与中国行动. 比较教育研究. 2024; 46(10):42-51, 102. [Zhuo Zelin. *China's global vision and actions in the field of higher education participation in the construction of international centers for scientific and technological innovation*. *Comparative studies in education*. 2024; 46(10):42-51, 102]. DOI: 10.20013/j.cnki.ICE.2024.10.05 (chin.).
7. Yushan W. Innovative development of Chinese regions: experience and recommendations for Russia. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2021; 12(2): 145-159. DOI: 10.18184/2079-4665.2021.12.2.145-159. EDN KNFFUT. (rus.).
8. Aganbegyan A.G. "Silicon valleys" — innovation zones in the USA, China, EU, Russia, and other countries. *Economics of Science*. 2023; 9(2):8-19. DOI: 10.22394/2410-132X-2023-9-2-8-19. EDN FIDKXW. (rus.).
9. Russian Academy of Sciences. Scientific Advisory Council on Legal, Psychological and Socio-Economic Problems of Society. Joint meeting (Moscow) / under the general editorship of Academician of the Russian Academy of Sciences Tosunyan G.A. *China: yesterday, today, tomorrow : materials of the meeting of November 19, 2022*. Moscow, New Printing Technologies, 2023; 188. (rus.).
10. Dianova-Klokov I.V., Metanyev D.A. China. Centers, dedicated to innovation works: the aspiration to the leadership. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 2:7-17. EDN UGUXAP. (rus.).
11. Kovalev M.M., Wang X. *China in the 21st century — a global innovative power*. Minsk, Belarusian State University, 2017; 239. EDN PLPPVF. (rus.).
12. Osinsky I.I. China in the world of science. *Eurasianism and the World*. 2019; 1:3-22. DOI: 10.18101/2306-630X-2019-1-3-22. EDN ZUDLBJ. (rus.).
13. Guruleva T.L., Bing W. Higher education in China: institutions and mechanisms of the state and party management. *RUDN Journal of Sociology*. 2020; 20(3):636-654. DOI: 10.22363/2313-2272-2020-20-3-636-654. EDN NKOTIT. (rus.).
14. 黎秋玲、宋金峪、钟振彬、项磊、魏鑫鑫、刘苏雅、王煜鑫、俞陶然. 探秘中国五大综合性国家科学中心. 羊城晚报, A06. [Li Qiuling, Song Jinyu, Zhong Zhenbin, Xiang Lei, Wei Xinxin, Liu Suya, Wang Yuxin, Yu Taoran. A Study of China's Five Comprehensive National Science Centers. *Yangcheng Evening News*, A06]. 2025. (chin.).
15. 樊志宏, 向恒. 超大、特大城市自我更新发展空间变革路径研究 — 基于全球科技产业变革视角. 现代城市研究. 2023; 11:28-33. [Fan Zhihong, Xiang Heng. Research on Spatial Transformation Paths for Self-Renewing Development of Megacities and Large Cities: From the Perspective of Global Technological Transformation of Industry. *Modern Urban Studies*. 2023; 11:28-33]. DOI: CNKI:SUN:XDCS.0.2023-11-005 (chin.).
16. Fang C., Yu D. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 162:126-136. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.014
17. Yang Z., Xu K. The Impact of Innovation Economy on Urban Form and Its Transformation: Taking Cases on Shenzhen. *The Urban Book Series*. 2025; 285-308. DOI: 10.1007/978-3-031-77752-3_15
18. Chikhi F., Li C., Ji Q., Zhou X. Review of Sponge City implementation in China: performance and policy. *Water Science & Technology*. 2023. DOI: 10.2166/wst.2023.312
19. Han Y., Cai J., Ma E., Du S., Lin J. Understanding Smart City Practice in Urban China: A Governance Perspective. *Sustainability*. 2023; 15(9):7034. DOI: 10.3390/su15097034
20. He J., Tan Y. Evolution logic of urban spatial growth governance and its enlightenment in China: From a perspective of spatial governance. *Journal of Urban Management*. 2025; 14(2):590-606. DOI: 10.1016/j.jum.2024.11.014
21. 数看中国城市科技创新发展. 中国科技奖励. 2021; 01:60-63. [Statistical Analysis of Scientific and Technological Innovation Development in Chinese Cities. *China Science and Technology Awards*. 2021; 01: 60-63]. DOI: CNKI: SUN:ZKJL.0.2021-01-022 (chin.).
22. 龚晨, 吴传清. 特大城市“未来科技城”发展模式比较 — 以京津汉杭四市为例. 科技进步与对策. 2014; 31(14):30-33. [Gong Chen, Wu Chuanqing. Comparison of Development Models of "Future Science and Technology Cities" in Megacities: A Case Study of Beijing, Tianjin, Wuhan, and Hangzhou. *Scientific and Technological Progress and Countermeasures*. 2014; 31(14):30-33]. DOI: CNKI:SUN:KJJB.0.2014-14-007 (chin.).
23. 周文. 特大城市科技创新发展对人口集聚的影响 — 来自北京的证据. 城市学刊. 2020; 41(05):22-29. [Zhou Wen. The Impact of Technological Innovation Development in Megacities on Population Agglomeration: Evidence from Beijing. *Urban Studies*. 2020; 41(05):22-29].

dence from Beijing. *Journal of Urban Studies*. 2020; 41(05): 22-29]. DOI: CNKI:SUN:YYSZ.0.2020-05-004 (chin.).

24. Technological Innovation in China: Current State and Challenges. *The Rise of China's Innovation Economy*. 2024; 1-44. DOI: 10.1007/978-981-99-8231-8_1

25. Chen B., Wang H., Wang X. Innovation Like China: Evidence from Chinese Local Officials' Promo-

tions. *China Economic Review*. 2024; 86:102203. DOI: 10.1016/j.chieco.2024.102203

26. Zhou Y., Xu H., Wang Y., Li C., Luo Q., Chen S. Promoting coordinated spatial governance of megacities in China via spatial organization of metropolitan areas. *Frontiers of Urban and Rural Planning*. 2024; 2(1). DOI: 10.1007/s44243-024-00034-1

Received October 31, 2025.

Adopted in revised form on November 8, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

B I O N O T E S: **Tatiana V. Bernyukevich** — Doctor of Philosophy, Professor, Professor of the Department of Management and Innovation, Professor of the Department of Social and Humanitarian Sciences and Technologies; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 274204, Scopus: 57195718426, ResearcherID: C-3085-2014 ORCID: 0000-0003-4471-0381; bernyukevich@inbox.ru;

Alena A. Bernyukevich — lecturer at the Faculty of World Economy and International Affairs; **National Research University Higher School of Economics**; 11 Pokrovsky bulvar, Moscow, 109028, Russian Federation; ID RSCI: 274204, ORCID: 0000 0003 4471 0381; bernyukevich.alena@mail.ru;

Sun Yan — Candidate of Cultural Studies, Professor, Dean of the Faculty of Russian Language; **Heilongjiang University of Foreign Languages**; 6 Helongjiang st., Harbin, 150080, People's Republic of China; sunyannushi@126.com.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144

Риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях жизненного цикла

Анатолий Викторович Алексейцев, Наталья Григорьевна Верстина,
Валерия Викторовна Глазкова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработан и апробирован подход к оценке жизненного цикла (ЖЦ) для несущих стальных конструкций объектов промышленности с применением стоимостной оценки рисков. Подход основан на принципах дисконтирования денежных потоков и включает детализированную декомпозицию всех этапов ЖЦ: от предпроектных исследований до утилизации, с выделением фазы реконструкции стальных конструкций как ключевого стоимостнообразующего фактора.

Материалы и методы. Центральным элементом исследования является интеграция в классическую модель стоимостной оценки вероятностных аварийных рисков (механических, коррозионных, усталостных и т.п.), выполненная с применением методологии анализа деревьев событий.

Результаты. Разработан риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях ЖЦ. На примере стропильной фермы пролетом 24 м проведен подробный расчет, иллюстрирующий динамику затрат и рисков в течение 40-летнего горизонта планирования. Результаты, представленные в табличной форме, демонстрируют, что доля рискованных составляющих может достигать 20–25 % от общей стоимости для решений с минимальными начальными инвестициями. Сравнительный анализ альтернатив с базовой и усиленной защитой подтверждает экономическую целесообразность превентивных инвестиций, обеспечивающих снижение совокупных затрат по ЖЦ на 35–45 % за счет резкого уменьшения эксплуатационных расходов и вероятности катастрофических отказов. Проведен анализ чувствительности, устанавливающий зависимость итоговой стоимости от ставки дисконтирования, стоимости простоя производства и достоверности исходных вероятностных данных.

Выводы. Разработанный подход предназначен для использования в технико-экономическом обосновании проектов при выборе конструктивных решений промышленных зданий в составе объектов промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стоимость жизненного цикла (LCC), стальные конструкции объектов промышленности, стропильные фермы, эксплуатационные риски, аварийная ситуация, анализ деревьев событий (ETA), дисконтирование, реконструкция, вероятностная оценка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алексейцев А.В., Верстина Н.Г., Глазкова В.В. Риск-ориентированный подход к оценке объектов промышленности в условиях жизненного цикла // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 135–144. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

Risk-based approach to assessment of industrial facilities within the framework of lifecycles

Anatoly V. Aleksetsev, Natalia G. Verstina, Valeriya V. Glazkova

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

ABSTRACT

Introduction. The authors developed and pilot-tested an approach to the lifecycle prognostication for load-bearing steel structures of industrial facilities using a cost-based risk assessment paradigm. The authors' approach is based on principles of discounted cash flows and itemized decomposition of each stage of a lifecycle, from pre-project studies to disposal, with a focus on the reconstruction phase of steel structures as a key cost generator.

Materials and methods. The core element of this research work is to integrate probabilistic risks of accidents (mechanical risks, corrosion, fatigue, etc.) into a classical model of cost assessment using event tree analysis.

Results. A risk-based approach was developed to assess lifecycles of industrial facilities. A roof truss with a 24-meter span served as an example for a detailed calculation made to illustrate the cost and risk pattern over a 40-year planning time-frame. The results, presented in tabular form, demonstrate that the risk share can reach 20–25 % of the total cost for solutions with minimal upfront investments. A comparative analysis of alternatives with basic and enhanced protection confirms the economic feasibility of preventive investments which reduce the total cost of the lifecycle by 35–45 % due to a se-

vere reduction in operating costs and the probability of disastrous failures. Sensitivity was analyzed to identify dependence of the final cost on the discount rate, the cost of production downtime, and reliability of initial probabilistic data.

Conclusions. The proposed approach can be contributed to feasibility studies of projects to choose structural solutions for industrial buildings constructed as part of industrial facilities.

KEYWORDS: lifecycle cost (LCC), steel structures of industrial buildings, roof trusses, operational risks, emergency situation, event tree analysis (ETA), discounting, reconstruction, probabilistic assessment, preventive investments

FOR CITATION: Aleksetsev A.V., Verstina N.G., Glazkova V.V. Risk-based approach to assessment of industrial facilities within the framework of lifecycles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):135-144. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.135-144 (rus.).

Corresponding author: Valeriya V. Glazkova, leram86@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобальной трансформации промышленного сектора, характеризующейся ростом сложности технологических процессов и ужесточением требований к безопасности и надежности, традиционные методы оценки эффективности инвестиций в объекты промышленности демонстрируют свою ограниченность. Классический «сметный подход», фокусирующийся на минимизации первоначальных (капитальных) затрат (Capital Expenditures — CAPEX), применительно к объектам с жизненным циклом (ЖЦ), исчисляемым десятилетиями, систематически приводит к принятию субоптимальных решений. Это происходит вследствие игнорирования значительной доли будущих операционных расходов (Operational Expenditures — OPEX), затрат на капитальный ремонт и реконструкцию, а также потенциальных финансовых потерь, связанных с реализацией аварийных рисков [1–3].

Стальной несущий каркас промышленного здания (рис.) представляет собой характерный пример важнейшего конструктивного элемента и при этом долгосрочного актива в составе объекта промышленности, чья реальная эффективность на протяжении ЖЦ определяется не стоимостью изготовления и монтажа, а совокупностью денежных потоков на всем периоде его службы. Прогрессирующая коррозия, усталостное повреждение, риск внезапных перегрузок формируют спектр угроз, способных вы-

звать частичное или полное обрушение конструкций с сопутствующими колоссальными издержками: прямыми затратами на аварийно-восстановительные работы, косвенными убытками от остановки производства, репутационным ущербом и, что наиболее критично, человеческими жертвами. Согласно исследованиям в области управления рисками инфраструктурных объектов, неучет этих составляющих может привести к занижению оценки полной стоимости владения (Total Cost of Ownership — TCO) на 30–60 % по сравнению с расчетами, основанными только на CAPEX [4–6].

Мировая научная и инженерно-экономическая практика в ответ на этот вызов активно развивает методологию оценки стоимости жизненного цикла (Life Cycle Costing — LCC) [7–12]. Современные тренды в данной области можно сгруппировать по трем основным направлениям:

1. Цифровизация и интеграция с BIM (Building Information Modeling). Создание «цифровых двойников» конструкций, позволяющих автоматизировать сбор данных о состоянии, прогнозировать износ и обновлять экономические модели в реальном времени. Исследования демонстрируют потенциал снижения ошибок прогнозирования LCC на 15–25 % за счет использования исторических данных из BIM-моделей аналогичных объектов.

2. Вероятностное моделирование и учет неопределенностей. Применение методов Монте-Карло,



Стальной каркас промышленного здания: 1 — колонны; 2 — стропильные фермы; 3 — обвязочные балки

Steel frame of an industrial building: 1 — columns; 2 — roof trusses; 3 — bracing beams

интервального анализа и fuzzy-логики для работы с неточными или стохастическими входными параметрами, такими как цена на металлопрокат, срок службы защитных покрытий, интенсивность коррозии [2]. Это дает возможность перейти для LCC от детерминированной оценки к вероятностной.

3. Инкорпорация риск-менеджмента в LCC-модели. Наиболее актуальное и сложное направление, предполагающее количественную денежную оценку последствий отказов. Работы показывают, что для стальных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, дисконтированная стоимость рисков (математическое ожидание ущерба) может достигать 20–35 % от общей LCC. Однако большинство существующих подходов к управлению рисками либо ограничиваются использованием общих поправочных коэффициентов «на риск», либо рассматривают риски обособленно, не связывая их напрямую с конкретными техническими решениями на этапе проектирования и изготовления.

Таким образом, наблюдается явный разрыв между необходимостью комплексного технико-экономического обоснования инвестиций в надежность и имеющимися упрощенными подходами. Настоящее исследование призвано предложить подход, который бы позволил преодолеть этот разрыв, обеспечив проектировщиков, инвесторов и службы эксплуатации объектов промышленности инструментом для сопоставления альтернатив на основе определения их эффективности с учетом вероятностной природы отказов.

Цель и новизна исследования заключаются в разработке практико-ориентированного подхода к расчету LCC для несущих стальных конструкций объектов промышленности (рис.), обеспечивающего раздельную и количественную оценку затрат на эксплуатацию, плановую реконструкцию и ликвидацию потенциальных аварийных ситуаций. Для достижения поставленной цели применительно к стальным конструкциям объектов промышленности была разработана расширенная декомпозиция ЖЦ с учетом таких этапов, как предпроектная подготовка, производство, монтаж, нормальная эксплуатация, текущие и капитальный ремонты, реконструкция, утилизация. Для каждого этапа формализован расчет всех видов затрат. В свою очередь, для этого на основе анализа статистики отказов и механизмов повреждения идентифицированы доминирующие аварийные риски на примере типовых стропильных ферм. Многообразие сценариев риска и отказов в несущих конструкциях требует рассмотрения различных исходов при определении LCC.

С этой целью может быть эффективно использован анализ деревьев событий (ЕТА) с присвоением стоимостных эквивалентов каждому сценарию развития аварии. При определении этих эквивалентов модель стоимостной оценки рисков должна однозначно устанавливать связь между дисконтиро-

ванными детерминированными затратами по всем этапам ЖЦ и математическими ожиданиями приведенного (относительного) ущерба от реализации идентифицированных рисков [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выделение несущей системы в качестве важнейшего конструктивного элемента и при этом долгосрочного актива в составе объектов промышленности основано на гипотезе о том, что стоимость оборудования промышленных зданий может рассматриваться отдельно и независимо от каркаса в случае его нормальной эксплуатации, а отказ ограждающих конструкций, как правило, не приводит к существенным финансовым потерям за короткий промежуток времени (стоимость оборудования сопоставима или превышает стоимость несущей системы) [15].

Концептуальная основа и базовые принципы подхода к оценке ЖЦ. В основе предлагаемого подхода лежит фундаментальное положение о временной ценности денег. Все будущие денежные потоки как оттоки (затраты), так и потенциальные притоки (ликвидационная стоимость), приводятся к моменту принятия инвестиционного решения (базовый год) с помощью ставки дисконтирования r . Расчет итоговой стоимости ЖЦ представлен дискретной моделью с шагом 1 год и горизонтом анализа по этапам ЖЦ, связанным с временем эксплуатации T_{op} с учетом ремонтов, реконструкции T_{rec} , демонтажа T_{dem} и утилизации, что может соответствовать в частном случае периоду владения активом или сроку кредитования. Общая формула для расчета итоговой стоимости ЖЦ LCC_R имеет вид:

$$LCC_R = \sum_{i=1}^{T_{op}} \frac{C_{op,i} + R_i}{(1+r)^i} + \sum_{j=1}^{T_{rec}} \frac{C_{rec,j}}{(1+r)^j} + \sum_{k=1}^{T_{dem}} \frac{C_{dem,k}}{(1+k)^j}, \quad (1)$$

где $C_{op,i}$, $C_{rec,j}$, $C_{dem,k}$ — стоимости владения активом на этапах эксплуатации, реконструкции, демонтажа и утилизации соответственно в году i, j, k ; R_i — стоимостное выражение риска финансовых потерь при возникновении аварийных ситуаций на этапе эксплуатации.

Стоимость $C_{op,i}$ применительно к стальной конструкции здания включает составляющие, связанные с его проектированием, заводским изготовлением, монтажом с учетом специфики укрупнительной сборки и технологической комплектации, а также ежегодные последующие затраты, связанные с плановыми текущими ремонтами, направленными на поддержание нормативного технического состояния. Стоимость $C_{rec,j}$ включает затраты на техническое обследование несущей системы, проектирование и устройство системы усиления или восстановления несущей способности стальных конструкций, а также затраты на поддержание работоспособности усилен-

ной системы. Следует отметить, что реконструкция здесь может быть обусловлена не только устранением повреждений конструкций, но и инвестиционными проектами, связанными с технической модернизацией или изменением функционального назначения здания.

Структура затрат в жизненном цикле конструктивной системы. Для адекватного учета специфики промышленного строительства предлагается разбить ЖЦ на ряд последовательных и логически взаимосвязанных частных этапов.

Этап 1. Предпроектная подготовка и проектирование. Данная фаза формирует техническую и организационную основу для всего последующего ЖЦ. Ее структура затрат включает:

- затраты на инженерные изыскания (геодезические, геологические, экологические, обследование территории). Зависят от площади и сложности участка;
- стоимость разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) или концепции, включая анализ технологических рисков (выполняется для крупных объектов);
- затраты на разработку рабочей проектной документации (архитектурные решения, конструктивные решения (КМ), детализованные чертежи для изготовления металлоконструкций (КМД), инженерные системы (при их влиянии на конструкцию), оплата проведения государственной или негосударственной экспертизы проектной документации, стоимость работ по внесению корректировок в проект по замечаниям экспертизы или заказчика)). Для определения стоимости проектирования все перечисленные составляющие затрат суммируются.

Этап 2. Производство, обработка и логистика металлоконструкций. Наиболее капиталоемкая фаза, определяющая ключевые эксплуатационные характеристики. Структура затрат на материал включает:

- стоимость основного материала: металлопроката (лист, двутавр, уголок) по цене за тонну на момент закупки, брутто-масса металла по чертежам КМД, тонны; стоимость технологических отходов металла (при резке, сверловке). Например, для ферм сложной формы этот показатель составляет 0,08–0,15 (8–15 %) от основного материала.

Структура стоимости изготовления, включает:

- заработную плату рабочих-сборщиков и сварщиков с начислениями;
- затраты на электроэнергию для работы станков и сварочного оборудования;
- амортизацию технологического оборудования (гильотины, станки плазменной резки, сварочные автоматы);
- затраты на операционный и приемочный контроль качества: визуальный, ультразвуковой контроль сварных швов (УЗК), измерение геометрии;

- стоимость антикоррозионной и огнезащитной обработки. Может варьироваться от стоимости покраски до горячего цинкования и нанесения вспучивающихся составов. Это критически важная статья затрат, определяющая долговечность металлоконструкций;

- затраты на складирование готовых конструкций до отгрузки.

Стоимость транспортировки (логистики) от завода-изготовителя до строительной площадки. Зависит от расстояния, массы и габаритов отправочных марок или сборочных технологических комплектов.

Этап 3. Строительно-монтажные работы — преобразование материалов в готовый актив. Затраты имеют следующую структуру:

- общеплощадочные расходы: устройство временных подъездных путей, ограждений, бытовых городков, инженерных сетей;
- подготовительные строительные работы: разработка котлованов под фундаменты, устройство оснований, точная геодезическая разбивка осей;
- основные монтажные операции: аренда и эксплуатация грузоподъемных механизмов (кранов), главный фактор — грузоподъемность и время работы;
- заработная плата бригады монтажников, такелажников;
- изготовление и использование монтажной оснастки, лесов, подмостей;
- стоимость монтажных элементов (болты, шпильки, прокладки);
- геодезический контроль смонтированных стальных конструкций.

Этап 4. Нормальная эксплуатация — ежегодные затраты, обеспечивающие поддержание работоспособности. Структура затрат этого этапа:

- ежегодные затраты на плановое техническое обследование несущих конструкций. Включают визуальный осмотр, инструментальный контроль толщины покрытий, выявление дефектов (коррозии, усталостных трещин, погибей и т.п.). Эти затраты могут быть постоянными или возрастать со временем;
- стоимость работ по результатам обследований: очистка от загрязнений, подтяжка болтовых соединений, устранение мелких повреждений, окраска, устройство (обновление) защиты от огневого воздействия.

Этап 5. Реконструкция или капитальный ремонт. Данный этап направлен на восстановление или повышение несущей способности конструктивной системы и включает такой набор затрат:

- затраты на детальное инструментальное техническое обследование перед реконструкцией (с применением неразрушающих и разрушающих методов) для оценки фактического состояния и разработки проекта усиления;

- стоимость частичного демонтажа поврежденных элементов;
- стоимость изготовления и поставки элементов системы усиления или полной замены поврежденных элементов;
- затраты на монтаж системы усиления/восстановления, включая временное обеспечение безопасности конструкции на период работ, связанных с реконструкцией.

Этап 6. Аварийное восстановление. Этот этап рассматривается только в случае реализации аварийной ситуации, а связанные с ней затраты включают в себя величину R_i в формуле (1). Для стальных конструкций эту величину можно вычислить так:

$$R_i = pU_i; p = f(\beta),$$

(2)

где U_i — размер ущерба от аварии в году i ; p — вероятность отказа, определяемая по теории надежности через индекс надежности β , зависящий от запаса прочности или деформируемости конструкции в аварийной ситуации. При отсутствии техногенных причин и агрессивных природно-климатических условий эта вероятность достаточно низкая: $p \approx 10^{-6}$.

Этап 7. Демонтаж и утилизация. Завершающая фаза ЖЦ включает следующие затраты:

- затраты на демонтаж демонтируемой конструкции;
- затраты на металл, отправляемый в переработку (его масса может составлять до 90 % от массы демонтируемой конструкции).

Затраты $C_{dem,k}$ (см. формулу (1)) должны вычисляться как сумма затрат на демонтаж и затрат на переработку демонтируемой конструкции с учетом возвратной суммы за металлолом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стропильные фермы покрытия промышленных зданий (рис.) представляют собой высоконагруженные статически определимые системы, чей отказ может привести к прогрессирующему обрушению значительной части крыши и кровли. Оценка их ЖЦ требует учета следующих особенностей [16–20]:

1. **Высокая чувствительность к коррозии узлов.** Наиболее уязвимыми являются верхние пояса в зоне конденсации влаги под утеплителем и узлы сопряжения раскосов с поясами, где возможны щелевая и контактная коррозия. Стоимость защиты от коррозии и регулярность инспекций становятся ключевыми управляющими параметрами, влияющими на долговечность всего объекта промышленности в целом.

2. **Циклический характер нагружения и усталость.** Помимо постоянной нагрузки, фермы могут воспринимать ветровые пульсации, температурные деформации, вибрации от работающего оборудования, кранов. Это инициирует усталостные трещины, в первую очередь, в сварных швах и зонах отверстий под болты. Следовательно, оценка ЖЦ должна учитывать затраты на усталостно-безопасное проектирование и специализированный контроль сварных швов.

3. **Риск внезапной аварийной перегрузки.** Возможен при аварийных ситуациях в цехе (падение груза, наезд транспорта), ошибках эксплуатации (скопление снега из-за неработающих водостоков, складирование материалов на кровле). Этот риск напрямую связан с культурой производства на предприятии.

На основе анализа отказов, фиксируемых при наблюдении опыта эксплуатации для стропильных ферм, можно выделить основные рисковые сценарии, требующие стоимостной оценки (табл. 1).

Табл. 1. Типология рисков отказа для стальной стропильной фермы

Table 1. Failure risk typology for a steel truss

Описание / Description	Формула для года i The formula for the year i
Катастрофический отказ элемента (пояса, раскоса, стойки) вследствие критической потери сечения из-за прогрессирующей коррозии, приведшей к разрушению под расчетной нагрузкой / Disastrous failure of an element (band, brace, or post) due to critical loss of cross-section due to progressive corrosion, resulting in failure under design load	$R_{cor,i} = p_{cor,i} U_{cor,i}$
Усталостное разрушение элемента в зоне концентратора напряжений (сварной шов растянутого раскоса, отверстие в поясе) / Fatigue failure of an element in a stress concentration zone (welded joint of a stretched brace, band opening)	$R_{fat,i} = p_{fat,i} U_{fat,i}$
Потеря устойчивости сжатого пояса или несущей способности растянутого элемента при однократном значительном превышении эксплуатационной нагрузки (техногенное воздействие, экстремальная снеговая нагрузка) / Stability loss of a compressed band or load-bearing capacity loss of a stretched element if the maximum operating load value is exceeded greatly (technogenic impact, extreme snow load)	$R_{over,i} = p_{over,i} U_{over,i}$
Потеря устойчивости сжатого пояса или несущей способности растянутого элемента при огневом воздействии / Stability loss of a compressed band or load-bearing capacity loss of a stretched element under fire exposure	$R_{fire,i} = p_{fire,i} U_{fire,i}$

Таким образом, получим общую формулу для расчета математического ожидания стоимостных последствий по всем типам рисков, представленных в табл. 1, за год:

R_i = \sum_{k=1}^4 p_{ik} U_{ik}. \tag{3}

Если необходимо оценить стоимость рисков на уровень базового года, то его величину следует ежегодно дисконтировать, как показано в формуле (1). Годовые вероятности реализации рисков p_{ik} зависят от времени и условий эксплуатации, возраста с течением этого времени. Если не учитывать конкретные схемы расположения оборудования и рабочих мест в здании, то можно предположить, что тяжесть последствий (полное обрушение фермы) примерно одинакова для всех сценариев, т.е. величины годовых ущербов U_{ik} приблизительно равны между собой.

Для каждого типа риска (см. табл. 1) строится отдельное дерево событий. Начиная с инициирующего неблагоприятного события будем прослеживать все возможные пути его развития через последовательность барьеров безопасности или систем защиты. Выполним построение ЕТА для риска R_{cor} (прогрессирующая коррозия):

1. Иницирующее событие: образование повреждения (скола, царапины) в защитном покрытии ключевого элемента фермы. Годовая вероятность: p_{cor,i} (зависит от среды, p_{cor,i} \approx 0,01/0,05).

2. Барьер 1 — обнаружение при инспекции. Проводится ежегодная инспекция:

• успех (ветвь А): повреждение обнаружено. Вероятность обнаружения (эффективность инспекции) p_{det,i} \approx 0,7/0,9. Результат: запланирован локальный ремонт покрытия. Затраты: незначительные, около 0,1 % от полной стоимости конструкции C_{tot} \cdot C_{det,i} \approx 0,001 C_{tot};

• неудача (ветвь Б): повреждение не обнаружено. Вероятность этого события 1 - p_{det,i}.

3. Барьер 2 — скорость коррозии. В поврежденном месте начинается коррозия:

• ветвь Б1: коррозия не достигает критической глубины/сечения к моменту следующей инспекции. Вероятность этого события (1 - p_{cor_c,i}). Результат:

повреждение может быть обнаружено позже, ремонт дороже. Затраты: C_{det,i} + C_{det,i^*}, где C_{det,i^*} — затраты на ремонт прогрессирующей за время t коррозии;

• ветвь Б2: коррозия достигает критического сечения. Вероятность этого события p_{cor_c,i} (зависит от агрессивности среды и свойств стали, растет со временем).

4. Барьер 3 — нагрузка в момент наличия критического повреждения. На конструкцию действуют пиковые нормативные нагрузки:

• ветвь Б2.1: элемент с критическим сечением выдерживает нагрузку. Вероятность этого события (1 - p_{cor_c,i});

• ветвь Б2.2 (наихудший сценарий): происходит разрушение элемента. Вероятность этого события (p_{cor_cr,i} \approx 0,8/0,95). Результат: обрушение части покрытия.

Вероятность наихудшего сценария за год: p_i = p_{cor,i} \cdot (1 - p_{det,i}) \cdot p_{cor_c,i} \cdot p_{cor_cr,i}, совокупный ущерб (табл. 1) можно приближенно вычислить по формуле U_{cor,i} = C_m + C_{nm}, где C_m — материальные затраты, связанные с аварийной ситуацией (стоимость фермы, связанных с ней конструкций, демонтажа и восстановления стальной конструкции при возможности); C_{nm} — нематериальные затраты, связанные со штрафами, репутационными рисками, компенсациями пострадавшим.

Приведем практический пример расчета стоимости жизненного цикла (LCC) для стропильной фермы с динамикой по годам. Исходные данные для расчета. Каркас здания, включающий 12 ферм. Стропильная ферма из стального профиля, пролет 24 м, шаг 6 м. Масса по чертежу (брутто): альтернатива 1 — 2,8 т, альтернатива 2 — 2,1 т. Условия эксплуатации: цех химического производства, среда агрессивности С4 (высокая) по ISO 12944-2. Расчетный срок службы T = 40 лет. Ставка дисконтирования: r = 8 % (средневзвешенная стоимость капитала для промышленного предприятия). Рассматриваемые альтернативные конструктивные решения:

1. Alt-1 (базовая): сталь С255. Антикоррозионная защита — система лакокрасочных покрытий (2 грунта, 2 эмали) общей толщиной 150 мкм. Расчетная долговечность покрытия 12 лет. Огнезащита не предусмотрена.

Табл. 2. Сравнительный расчет LCC по строительным конструкциям зданий из 12 ферм

Table 2. Comparative calculation of LCC for building structures of 12 trusses

Статья затрат Cost item	Альтернатива 1 (Alt-1, базовая), стоимость, тыс. руб. / Alternative 1 (Alt-1, basic), cost, thousand rubles	Альтернатива 2 (Alt-2, премиум), стоимость, тыс. руб. / Alternative 2 (Alt-2, premium), cost, thousand rubles	Комментарий / Comment
1. Проектирование Design	250	280	+30 из-за расчета огнестойкости и трудоемкости проектирования узлов / +30 due to the calculation of fire resistance and node design complexity

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Статья затрат Cost item	Альтернатива 1 (Alt-1, базовая), стоимость, тыс. руб. / Alternative 1 (Alt-1, basic), cost, thousand rubles	Альтернатива 2 (Alt-2, премиум), стоимость, тыс. руб. / Alternative 2 (Alt-2, premium), cost, thousand rubles	Комментарий / Comment
2. Производство Production	3,200	3,100	–100, несмотря на дорогую защиту, за счет экономии металла (С345) / –100, despite expensive protection, due to saved metal (C345)
3. Монтаж Mounting	1,300	1,050	–250 за счет меньшей массы и объема конструкций / –250 due to lower mass and volume of the structures
4. Эксплуатация Exploitation	1,950	1,050	–900. Alt-1: две дорогие перекраски. Alt-2: только инспекции и один ремонт / –900. Alt-1: two expensive repaints. Alt-2: examination sessions and one repair only
5. Реконструкция Reconstruction	1,500	450	–1050. Alt-1: два цикла усиления/замены. Alt-2: один цикл ремонта / –1,050. Alt-1: two amplification/replacement cycles. Alt-2: one repair cycle
6. Утилизация Disposal	–180	–140	+40. Меньший доход от лома у Alt-2 из-за меньшей массы +40. Alt-2 has lower scrap revenue due to its lower mass
7. Риски / Risks	1,720	380	–1,340. Ключевое преимущество –1.340. Key advantage
Итого LCC Total LCC	9,740	6,170	Экономия по Alt-2: 3,570 тыс. руб. (36,7 %) / Savings for Alt-2: 3.570 thousand rubles (36.7 %)
Доля рисков в LCC, % / Share of risks in LCC, %	17,7	6,2	–

2. Alt-2 (премиум): сталь С345. Антикоррозионная защита — горячее цинкование (толщина 80 мкм) + полиуретановый финишный слой. Огнезащита — тонкослойное вспучивающееся покрытие (предел огнестойкости R15). Долговечность системы — 25 лет.

План технических мероприятий: для Alt-1 — замена защитного покрытия и усиление 30 % элементов на 12-й и 24-й год. Для Alt-2 — инспекция и локальный ремонт на 25-й год. Параметры рисков (оценочные, на основе инженерного опыта): ущерб от обрушения $U_i = 80\,000$ руб. Базовые годовые вероятности для нового объекта:

- Alt-1: $p_{cor,i} = 0,03$, $p_{det,i} = 0,8$, $p_{cr,i} = 0,9$. $p_{cr,i}$ возрастает линейно от 0,001 в год 1 до 0,02 в год 12 (до перекраски);
- Alt-2: $p_{cor,i} = 0,01$, $p_{det,i} = 0,9$, $p_{cr,i} = 0,9$. $p_{cr,i}$ возрастает от 0,0001 до 0,002 за 25 лет. Вероятно-

сти $p_{fat,i}$ и $p_{over,i}$ приняты постоянными: Alt-1: 0,0003 и 0,0002; Alt-2: 0,00015 и 0,0001 соответственно. Вероятность $p_{fire,i} = 0$, возгорание исключено. Результаты расчета LCC по рассматриваемым альтернативам приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная модель стоимостной оценки рисков и результаты расчета демонстрируют, что для объектов промышленности эффективность технических решений не может быть оценена в отрыве от анализа их влияния на полный ЖЦ и связанные с ним риски. Выбор в пользу минимальных капитальных вложений (альтернатива 1) оказывается стратегической ошибкой, приводящей к более высоким совокупным затратам. Инвестиции в качественные материалы, современные системы защиты и детальное проектирование (альтернатива 2), напротив,

определяют эффективный портфель превентивных мер. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Рисквая составляющая является существенным, а часто и определяющим фактором итоговой стоимости ЖЦ для стальных конструкций, в особенности работающих в агрессивных промышленных средах. В рассмотренном примере ее доля в ЛСС для базового решения достигала 17,7 %, что сопоставимо с затратами на монтаж или эксплуатацию. Использование методологии Event Tree Analysis (ETA) позволяет не только оценить этот компонент количественно, но и выявить наиболее эффективные точки приложения управленческих инструментов для его снижения (например, повышение вероятности обнаружения дефектов $p_{det,i}$ через улучшение системы мониторинга).

2. Выделение этапа реконструкции в самостоятельную стоимостную фазу методологически важно. Это позволяет наглядно оценить экономические последствия различных стратегий обслуживания стальной конструкции. Решения, увеличивающие межремонтный период (как в альтернативе 2), обеспечивают значительную экономию не только за счет отсрочки затрат, но и за счет снижения кумулятивных рисков в периоды между реконструкциями. Модель стоимостной оценки рисков дает возможность опти-

мизировать график ремонтных мероприятий, балансируя затраты на них и растущие риски.

3. Чувствительность итоговых экономических показателей к макропараметрам (ставка дисконтирования) и отраслевым условиям (стоимость простоя) крайне высока. Это означает, что универсальных «лучших решений» не существует. Применение предложенного подхода к оценке ЖЦ несущих стальных конструкций промышленных зданий с применением стоимостной оценки рисков требует его адаптации под конкретный бизнес-контекст объекта промышленности, стоимость капитала и производственную модель. Подход выступает не как калькулятор с единственным ответом, а как инструмент для сценарного анализа и обоснования решений в условиях неопределенности. Его практическая ценность максимально раскрывается при интеграции с отраслевыми базами данных по отказам и долговечности материалов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции предложенной модели стоимостной оценки рисков с платформами информационного моделирования (BIM) для создания автоматизированных систем поддержки принятия решений на ранних стадиях проектирования, а также в разработке стандартизированных отраслевых баз данных для параметров надежности и стоимостных последствий отказов конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эминян К.М. Оптимальность и равновесие экономических событий как единство противоречий // Дискуссия. 2024. № 2 (123). С. 6–10. DOI: 10.46320/2077-7639-2024-2-123-6-10. EDN JMRZXA.

2. Basu M., Kaja N., Rao P. Study on life cycle assessment and life cycle sustainability assessment of buildings : a review // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2024. Vol. 105. Issue 3. Pp. 749–766. DOI: 10.1007/s40030-024-00831-3. EDN SUEZGK.

3. Moutik B., Summerscales J., Graham-Jones J., Pemberton R. Life cycle assessment research trends and implications: a bibliometric analysis // Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 18. P. 13408. DOI: 10.3390/su151813408. EDN MDNTYO.

4. Алексейцев А.В. Научные основы оптимизации железобетонных конструкций с использованием генетических алгоритмов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 481 с. EDN GMVSGI.

5. Терехов И.Г., Варивода В.А., Сухинин Д.А. Теория расчета железобетонных конструкций в строительстве: технико-экономические аспекты // Human Progress. 2024. Т. 10. № 12. DOI: 10.46320/2073-4506-2024-12a-7. EDN AEHKLA.

6. Udisi B., Gorgolewski M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment // Environmental Research

Communications. 2025. Vol. 7. Issue 2. P. 022003. DOI: 10.1088/2515-7620/adb669. EDN OOPNKO.

7. Кисель Т.Н., Мишланова М.Ю., Галеев К.Ф. Исследование рисков участников инвестиционно-строительных проектов в условиях внедрения технологий информационного моделирования // Real Estate: Economics, Management. 2023. № 4. С. 37–40. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-4-37-40. EDN ADNFTG.

8. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 40. Issue 1–6. Pp. 201–214. DOI: 10.1007/s00158-008-0351-3

9. 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 Mind-set and Technology. Geneva, World Economic Forum, 2016.

10. Elsner Ju., Gabriel A., Ackermann T., Körkemeyer Ja., Schmitt R.H. Auf digitalen zwillingen basiertes life cycle assessment // ZWF. Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 2023. Vol. 118. Issue 12. Pp. 883–887. DOI: 10.1515/zwf-2023-1167. EDN PJRGCD.

11. Golej Ju., Veverková D., Schwarz M., Sečkar M. Life cycle assessment and software tools comparison // International Journal of Environment and Sustainable Development. 2024. Vol. 1. Issue 1. DOI: 10.1504/ijesd.2024.10064669. EDN AOHVCE.

12. Martínez-Ramón N., Calvo-Rodríguez F., Iribarren D., Dufour Ja. Frameworks for the application of machine learning in life cycle assessment for process modeling // *Cleaner Environmental Systems*. 2024. Vol. 14. P. 100221. DOI: 10.1016/j.cesys.2024.100221

13. 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

14. Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. *Megaprojects and Risk*. UK; New York : Cambridge University Press, 2003.

15. Канатова Э.А., Медведева М.Н., Смирнова А.А. Усиление металлических конструкций при реконструкции // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2024. № 1. С. 57–62. EDN ZSOPBT.

16. Kasulanati M.L., Pancharathi R.K. Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: aggregate

gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 449. P. 138510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138510

17. Marcinkowski A., Hareža P. Integration of life cycle sustainability assessment indicators in different energy sectors // *Economics and Environment*. 2025. Vol. 91. Issue 4. P. 799. DOI: 10.34659/eis.2024.91.4.799

18. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage // *Engineering Optimization*. 2023. Vol. 55. Issue 11. Pp. 1905–1922. DOI: 10.1080/0305215x.2022.2134356

19. Wood J.G.M. Pipers row car park collapse: Identifying risk // *Concrete*. 2003. Vol. 37. Issue 9. Pp. 29–31.

20. Xudong H., Shuli S., Pu C., Tao L. A multi-scenario analysis method for collapse risks due to initial local failure of building structures // *Structures*. 2023. Vol. 58. P. 105479. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105479

Поступила в редакцию 12 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 21 января 2026 г.

Одобрена для публикации 23 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Анатолий Викторович Алексейцев — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

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;

Валерия Викторовна Глазкова — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Eminyan K.M. Optimality and equilibrium of economic events as a unity of contradictions. *Discussion*. 2024; 2(123):6-10. DOI: 10.46320/2077-7639-2024-2-123-6-10. EDN JMRZXA. (rus.).

2. Basu M., Kaja N., Rao P. Study on life cycle assessment and life cycle sustainability assessment of buildings : a review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2024; 105(3):749-766. DOI: 10.1007/s40030-024-00831-3. EDN SUEZGK

3. Moutik B., Summerscales J., Graham-Jones J., Pemberton R. Life cycle assessment research trends and implications : a bibliometric analysis. *Sustainability*. 2023; 15(18):13408. DOI: 10.3390/su151813408. EDN MDNTYO.

4. Aleksetsev A.V. *Scientific foundations of optimization of reinforced concrete structures using genetic algorithms : dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2021; 481. EDN GMVSGI. (rus.).

5. Terekhov I.G., Varivoda V.A., Sukhinin D.A. Theory of calculation of reinforced concrete structures in construction: technical and economic aspects. *Human Progress*. 2024; 10(12). DOI: 10.46320/2073-4506-2024-12a-7. EDN AEHKLK. (rus.).

6. Udisi B., Gorgolewski M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment. *Environmental Research Communications*. 2025; 7(2):022003. DOI: 10.1088/2515-7620/adb669. EDN OOPNKO.

7. Kisel T.N., Mishlanova M.Yu., Galeev K.F. Study of the risks of investment and construction projects of participants in the context of the introduction of information modeling technologies. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; (4):37-40. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-4-37-40. EDN ADNFTG. (rus.).
8. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010; 40(1-6):201-214. DOI: 10.1007/s00158-008-0351-3
9. De Almeida P.R., Solas M.Z., Renz A., Buhler M.M., Herbert P., Castagnino S. et al. *Shaping the future of construction: a breakthrough in thinking and technology*. Geneva, World Economic Forum, 2016.
10. Elsner Ju., Gabriel A., Ackermann T., Körkemeyer Ja., Schmitt R.H. Auf digitalen zwilligen basiertes life cycle assessment. *ZWF. Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 2023; 118(12):883-887. DOI: 10.1515/zwf-2023-1167. EDN PJRGCD
11. Golej Ju., Veverková D., Schwarz M., Sečkář M. Life cycle assessment and software tools comparison. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2024; 1(1). DOI: 10.1504/ijesd.2024.10064669. EDN AOHVCE.
12. Martínez-Ramón N., Calvo-Rodríguez F., Iribarren D., Dufour Ja. Frameworks for the application of machine learning in life cycle assessment for process modeling. *Cleaner Environmental Systems*. 2024; 14:100221. DOI: 10.1016/j.cesys.2024.100221
13. 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
14. Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. *Megaprojects and Risk*. UK; New York, Cambridge University Press, 2003.
15. Kanatova E.A., Medvedeva M.N., Smirva A.A. Strengthening metal structures during reconstruction. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2024; 1:57-62. EDN ZSOPBT. (rus.).
16. Kasulanati M.L., Pancharathi R.K. Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: aggregate gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment. *Construction and Building Materials*. 2024; 449:138510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138510
17. Marcinkowski A., Haręza P. Integration of life cycle sustainability assessment indicators in different energy sectors. *Economics and Environment*. 2025; 91(4):799. DOI: 10.34659/eis.2024.91.4.799
18. Tamrazyan A., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage. *Engineering Optimization*. 2023; 55(11):1905-1922. DOI: 10.1080/0305215x.2022.213-4356
19. Wood J.G.M. Collapse of the parking lot on Pipers Row: risk definition. *Concrete*. 2003; 37(9):29-31.
20. Xudong H., Shuli S., Pu C., Tao L. A multi-scenario analysis method for collapse risks due to initial local failure of building structures. *Structures*. 2023; 58:105479. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105479

Received January 12, 2026.

Adopted in revised form on January 21, 2026.

Approved for publication on January 23, 2026.

B I O N O T E S : **Anatoly V. Aleksetsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

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;

Valeriya V. Glazkova — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, 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: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru.

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список 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 Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

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.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подписи рисунков и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В Сведениях об авторах (Bionotes) представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

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.

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 библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf 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.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

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 Фамилия¹, 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. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² 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

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.

Biographies: **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.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

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/>

